

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO À
CARVÃO VEGETAL COMO ADIÇÃO NO CONCRETO**

Carlos José Massucato

**Campinas, SP
Dezembro, 2005**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO À CARVÃO VEGETAL COMO ADIÇÃO NO CONCRETO

Carlos José Massucato

Orientador: Vladimir Antonio Paulon

Dissertação de Mestrado apresentada à
Comissão de pós-graduação da Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
da Universidade Estadual de Campinas, para
obtenção do Título de Mestre na Área de
Concentração em Edificações.

Campinas, SP
Dezembro, 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M389u Massucato, Carlos José
 Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal
 como adição no concreto / Carlos José Massucato.--
 Campinas, SP: [s.n.], 2005.

 Orientador: Vladimir Antonio Paulon.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
 Urbanismo.

 1. Concreto. 2. Carvão vegetal. 3. Escória. 4. Alto
 forno. 5. Coque. I. Paulon, Vladimir Antonio. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: The use of blast furnace slag from charcoal as addition in
concrete

Palavras-chave em Inglês: Concrete, Charcoal, Slag, Blast furnaces, Coke .
Área de concentração: Concentração em Edificações.

Titulação: Mestrado: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho e
Cláudio Sbrighi Neto

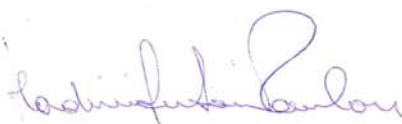
Data da defesa: 02/12/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO À CARVÃO VEGETAL COMO
ADIÇÃO NO CONCRETO**

Carlos José Massucato

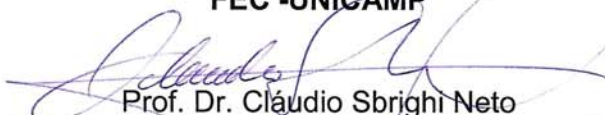
**Tese de Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora,
constituída por:**



**Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon
Presidente e Orientador -FEC - UNICAMP**



**Prof. Dr. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho
FEC -UNICAMP**



**Prof. Dr. Cláudio Sbrighi Neto
Faculdade de Engenharia Civil da Fundação Armando Álvares Penteado**

Campinas, 02 de dezembro de 2005

DEDICATÓRIA

O meu coração
tem um sentimento mágico
que sempre me ajuda
e me faz confiar em Deus

Ele me faz andar
Pelo bom caminho
Amar e ajudar
E me concentrar na vida

Acho que sei
Que sentimento é...
Esse sentimento deve ser
A Fé !!

Maria Carolina G. Massucato

**Este trabalho é dedicado a minha mulher Kátia,
meu filho André, minha família e aos meus amigos.**

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a participação de muitas pessoas, porém dificilmente eu conseguiria reconhecer todos que de alguma forma me auxiliaram. Durante este trabalho passamos por grandes dificuldades e só a dedicação e o compromisso assumido pelos amigos foi possível a sua conclusão. Ressalto inicialmente o ambiente extremamente profissional da Concrepav S/A que me permitiu desenvolver este trabalho interagido com o setor produtivo.

Foram muitos os amigos que me auxiliaram neste trabalho. Gostaria de destacar a participação do departamento técnico da Concrepav S/A pelo: Eng.^o Silvio Obata, pela assistente Bianca Rey e aos laboratoristas para a realização dos ensaios e nas discussões dos resultados. Ao Eng.^o José Carlos de Moraes pelo auxílio nos temas complexos que envolveram este trabalho. Aos amigos da UNICAMP, Eng.^a Adriana, Eng.^a Laura e Eng.^o Domingos e em especial a Eng.^a Ana Elisabete.

Pelos conhecimentos recebidos do Eng.^o Mauro Movikawa e do Geol. Cláudio Sbrighi Neto pois sem eles este trabalho não teria começado.

Finalmente ao Dr. Vladimir Antonio Paulon, pela competente orientação e apoio.

E não poderia deixar de agradecer a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS		x
LISTA DE TABELAS		xii
LISTA DE SÍMBOLOS		xiv
RESUMO		xv
ABSTRACT		xvi
1	INTRODUÇÃO	1
1. 1	Objetivos	1
1. 2	Justificativa	2
1. 3	Apresentação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2. 1	Histórico da utilização da escória de alto-forno	5
2. 2	Histórico brasileiro	7
2. 3	A produção da escória de alto-forno	8
2. 3. 1	Alto-forno à carvão vegetal e à coque	10
2. 3. 2	Resfriamento das escórias	12
2. 4	Especificações normativas para escória de alto-forno	14
2. 5	Hidraulicidade das escórias	16
2. 5. 1	Composição química das escórias	17
2. 5. 2	Grau de vitrificação das escórias de alto-forno	18

2. 5. 3	Reatividade das escórias de alto-forno e a sua relação com a composição química e o estado vítreo	18
2. 6	Avaliação da atividade hidráulica das escórias de alto-forno	20
2. 6. 1	Método visual	21
2. 6. 2	Método com base na composição química	21
2. 6. 3	Métodos baseados na microestrutura	22
2. 6. 4	Método baseado na própria hidratação	24
2. 6. 5	A escória de alto-forno como aglomerante	24
2. 6. 5. 1	Resistência mecânica	26
2. 6. 5. 2	Módulo de elasticidade	27
2. 6. 5. 3	Trabalhabilidade	27
2. 6. 5. 4	Tempo de Pega	28
2. 6. 5. 5	Exsudação	28
2. 6. 6	Conservação ambiental	29
2. 6. 7	A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto	32
2. 6. 8	A questão normativa para adição de escória de alto-forno no concreto	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3. 1.	Cimento	45
3. 1. 1	Escória de alto-forno	48
3. 1. 2	Agregados	55
3. 1. 3	Aditivos	56
3. 1. 4	Água	56
3. 2	Metodologia	57
3. 2. 1	Método de dissolução seletiva para determinar o teor de escória em cimento	59
3. 2. 2	Atividade pozolânica das escórias	60
3. 2. 3	Preparação de concreto em laboratório	61
3. 2. 4	Resistência à compressão axial	61
3. 2. 5	Resistência à tração na flexão	62

3. 2. 6	Módulo de elasticidade	62
3. 2. 7	Consistência do concreto pelo abatimento	63
3. 2. 8	Teor de ar incorporado	64
3. 2. 9	Tempo de pega	64
3. 2. 10	Exsudação	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4. 1	Hidraulicidade das escórias	67
4. 2	Resistência à compressão	69
4. 2. 1	Resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à carvão vegetal	72
4. 2. 2	Resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque	73
4. 2. 3	Resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal	74
4. 2. 4	Resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque	76
4. 3	Resistência á tração na flexão	78
4. 4	Módulo de elasticidade	80
4. 5	Consistência do concreto pelo abatimento	83
4. 6	Teor de ar incorporado	84
4. 7	Tempo de pega	85
4. 8	Exsudação	86
4. 9	Análise econômica	88
5	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXOS	100
	Anexo A – Relação dos produtores de ferro-gusa, número de altos-fornos e capacidade nominal	101
	Anexo B – Planilha de resultados dos ensaios de compressão axial	103

Anexo C – Modelo de regressão para compressão axial e tração na flexão - relação água/aglomerante x resistência (curva de Abrams)	104
Anexo D - Modelo de regressão para resistência à compressão axial x idade	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Posição das escórias no diagrama clássico de RANKIN	9
Figura 2.2 - Representação esquemática de um alto-forno	11
Figura 2.3 - Granulação da escória	13
Figura 2.4 - Capim-elefante	31
Figura 2.5 - Consumo de escória de alto-forno moída nas empresas associadas ao SCA nos Estados Unidos	34
Figura 2.6 - (a) Construção do Air Train JFK e (b) obra finalizada em New York.	34
Figura 3.1 - Difratoograma da escória de alto-forno à carvão vegetal	51
Figura 3.2 - Difratoograma da escória de alto-forno à coque	51
Figura 3.3 - Aspecto da escória de alto-forno granulada	54
Figura 3.4 - Aspecto da escória de alto-forno moída e do cimento Portland	54
Figura 4.1 - Curvas de Abrams do concreto sem adição de escória	71
Figura 4.2 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à carvão vegetal	73
Figura 4.3 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque	74
Figura 4.4 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal	76
Figura 4.5 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque	78

Figura 4.6 - Influência da adição de escória na resistência à tração na flexão aos 28 dias para as relações água/aglomerante 0,65, 0,60 e 0,55	79
Figura 4.7 - Relação entre o módulo de elasticidade com a respectiva resistência à compressão	81
Figura 4.8 - Comportamento do tempo de início de pega em função do tipo de adição de escória e relação água/aglomerante	85
Figura 4.9 - Comportamento do tempo de fim de pega em função do tipo de adição de escória e relação água/aglomerante	86
Figura 4.10 - Comportamento da exsudação para os traços sem adição e com 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dados comparativos entre o alto-forno à carvão vegetal e o alto-forno à coque	11
Tabela 2.2 - Composição química da escória de alto-forno, em porcentagem	17
Tabela 2.3 - Componentes mineralógicos das escórias	19
Tabela 2.4 - Especificação quanto à composição química das escórias	22
Tabela 2.5 - Produção de ferro-gusa no Brasil por tipo de redutor empregado	36
Tabela 2.6 - Teores das adições de escória e pozolana de acordo com as normas brasileiras	39
Tabela 2.7 - Requisitos químicos para escórias de alto-forno por normas Internacionais	40
Tabela 2.8 - Requisitos físicos para escórias de alto-forno por normas Internacionais	41
Tabela 2.9 - Diferenças máximas admissíveis para avaliar a uniformidade do concreto de uma betonada	44
Tabela 3.1 - Composição química do cimento CP V ARI RS	46
Tabela 3.2 - Caracterização físico-mecânica do cimento CP V ARI RS	47
Tabela 3.3 - Teor de escória do cimento CP V ARI RS	47
Tabela 3.4 - Grau de vitrificação e índice de refração da escória de alto-forno	48
Tabela 3.5 - Composição química da escória de alto-forno	49
Tabela 3.6 - Minerais da escória de alto-forno pela difratometria de raio-X	50
Tabela 3.7 - Caracterização física da escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque	52

Tabela 3.8 - Análise granulométrica da escória de alto-forno	53
Tabela 3.9 - Caracterização física dos agregados miúdos e graúdos	55
Tabela 3.10 - Teor de sólidos e pH do aditivo	56
Tabela 3.11 - Análise química da água	56
Tabela 3.12 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade especificadas pela NBR 6118:2003 com os traços de concreto unitários em massa dos concreto estudados	57
Tabela 3.13 - Teores de adição de escória de alto-forno para os traços de concreto	58
 Tabela 4.1 - Resistência relativa média à compressão para diversas idades e adições	 70
Tabela 4.2 - Redução/aumento médio da resistência do concreto em relação ao concreto referência	71
Tabela 4.3 - Redução da resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal em comparação com o concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal	75
Tabela 4.4 - Redução/aumento da resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque em comparação com o concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque	77
Tabela 4.5 - Relação entre a resistência à tração na flexão com a resistência à compressão	80
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de abatimento no concreto (slump-test)	84
Tabela 4.7 - Rendimento técnico e econômico dos traços estudados	89

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

FeO – Óxido de ferro

S - Enxofre

C_3S - Alita

C_2S - Belita

KOH – Hidróxido de potássio

NaOH – Hidróxido de sódio

CaOI – Óxido de cálcio livre

SO_3 – Anidrido sulfúrico

K_2O – Óxido de potássio

PF – Perda ao fogo

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ - Caulinita

$(\text{K1Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8])$ - Feldspato

CaSiO_3 - Wollastonita

$\alpha\text{-Fé}$ – Ferro metálico

Fe_3O_4 - Magnetita

Fe_3O_3 - Hematita

CaCO_3 - Calcita

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

MASSUCATO, C. J. ***Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto***. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. p.120. Dissertação de Mestrado.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo principal avaliar propriedades oriundas da adição de escória de alto-forno à carvão vegetal, do concreto no estado fresco e endurecido, produzido com cimentos que já utilizam em sua composição a escória de alto-forno. Com a determinação da quantidade de escória de alto-forno pelo método de dissolução seletiva, foi possível adicionar escória de alto-forno no concreto até os limites estabelecidos na especificação do cimento de alto-forno (CPIII) pela NBR 5735 (ABNT, 1991) e conhecer o efeito na resistência mecânica, módulo de elasticidade, abatimento, incorporação de ar, tempo de pega e exsudação, em traços de concreto sem adição e com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque. As indústrias de cimento utilizam, em sua maioria, escórias provenientes dos altos-fornos à coque. Entretanto, o tratamento adequado nas escórias de alto-forno à carvão vegetal pode ampliar o consumo deste produto como adição mineral diretamente nas centrais de concreto, com a vantagem de ser uma fonte renovável de energia e eliminar este resíduo que se acumula nas usinas siderúrgicas. O estudo comprovou que, a utilização da escória de alto-forno à carvão vegetal como adição, não provoca alterações nas propriedades do concreto no estado fresco, em comparação com a escória de alto-forno à coque. A resistência à compressão com adição da escória de alto-forno à carvão vegetal aumentou em até 5% em idades superiores a 60 dias em comparação com o concreto sem adição de escória.

Palavras-chave: concreto, carvão vegetal, escória, alto-forno, coque.

MASSUCATO, C. J. *The use of blast furnace slag from charcoal as addition in concrete*. Campinas, College of Civil Engineering, State University of Campinas, 2005, 120 p. Thesis of Master Degree.

ABSTRACT

This study had the main purpose to evaluate properties of fresh and hardened concrete in with slag addition of blast furnace from charcoal in concrete produced with cements that already use in its composition the blast furnace slag. With the determination of the amount of slag of blast furnace by the selective method of dissolution, it was possible to add slag of blast furnace in concrete up to the limits established by NBR 5735 (ABNT, 1991) and to know the effect in concrete resistance, modulus of elasticity, slump test, air entrained concrete, setting of the cement and bleeding, in the mix proportions of concrete with and without slag addition of blast furnace from charcoal and coke. The cement industries use in its majority slag from coke deriving from blast furnace. However, the suitable treatment in slag of blast furnace from charcoal can extend the consumption of this product as mineral addition directly in the concrete plant, with the advantage of being a renewable source of energy and to eliminate this residue that accumulates in the siderurgical plants. The study proved that the use of the slag of blast furnace from charcoal as addition in concrete presented the same properties of fresh concrete compared with the slag of blast furnace with coke. The compressive strength increased in 5% at superior ages at 60th day in comparison without slag addition.

Key Word: concrete, charcoal, slag, blast furnace, coke.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal. Sendo este, produzido com cimentos que já utilizam em sua composição a escória de alto-forno.

O efeito da adição da escória de alto-forno à carvão vegetal foi avaliado em traços de concreto com as relações água/aglomerante estabelecidas pelas classes de agressividade I, II e III da NBR 6118 (ABNT, 2003) com os teores de 35% e 70% de escória na mistura. Comparativamente, os traços de concreto foram avaliados com adições de escórias de alto-forno à coque comumente utilizado pelas indústrias de cimento e com traços de concreto sem adição de escória.

O efeito das adições foi avaliado através da resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, teor de ar incorporado, tempo de pega e exsudação, de acordo com as especificações da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

As limitações normativas estabelecem que o teor máximo de escória que pode ser adicionada ao cimento tipo III é 70%. Sendo assim é necessário o conhecimento do teor de escória adicionado ao cimento em sua fabricação. Este teor foi avaliado pelo método de dissolução seletiva por EDTA⁽¹⁾ baseado nos estudos de DEMOULIAN *et al.*. (1980) apresentados no 7º Congresso Internacional de Química de Cimentos em Paris.

Atualmente os cimentos com adições, denominados de cimentos compostos são os tipos mais produzidos no Brasil. Os cimentos com adições de escória, tipo CP II E, o CP III e o CP V ARI RS são os mais consumidos no Estado de São Paulo, que é o maior mercado consumidor do Brasil. Esse foi o motivo da escolha do CP V ARI RS no estudo.

Na Comissão de Estudo de Controle da Qualidade do Concreto da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT sobre o texto da norma *NBR 12655:1996 - Preparo, controle e recebimento de concreto*, foi proposto a eliminação das adições minerais no concreto (exceto metacaulim e sílica ativa), porque nos outros países as adições são realizadas somente nos cimentos sem adição mineral em centrais misturadoras de concreto.

1.2 Justificativa

As escórias de alto-forno à carvão vegetal são produzidas em sua maioria por produtores independentes de ferro-gusa. A quase totalidade das escórias de alto-forno à carvão vegetal ainda se constituem em resíduos que se acumulam nas usinas. Estas escórias, quando granuladas, apresentam atividades hidráulicas podendo ser utilizadas como adições no cimento ou diretamente no concreto.

⁽¹⁾ EDTA: Disódico PA.

Tecnicamente a escória de alto-forno à carvão vegetal tem potencial para ser utilizada como adição mineral no concreto, desde que corretamente interpretada nas especificações normativas vigentes no Brasil. Economicamente tem custos menores em comparação a escória de alto-forno à coque. Entretanto pode apresentar reatividade menor, necessitando de uma criteriosa avaliação da sua viabilidade.

A preocupação com os destinos dos resíduos siderúrgicos é um problema mundial sob o aspecto ecológico. O fato da escória de alto-forno à carvão vegetal utilizar uma fonte renovável de energia (eucalipto), com o reflorestamento de grandes áreas proporciona um aspecto favorável para o desenvolvimento deste produto.

Deve-se esclarecer também, que as deficiências normativas sobre as adições minerais podem gerar alteração na classificação da escória de alto-forno à carvão vegetal, impedindo a sua classificação como escória, tornando-a uma pozolana artificial. Esta classificação limita o consumo deste produto.

Desta forma justifica-se este estudo através de:

- Resultados experimentais do concreto com adição de escória de alto-forno em cimentos com adição de escória;
- Avaliação da atividade hidráulica por módulos químicos para classificação da escória de alto-forno à carvão vegetal como básica;
- Contribuição à futura normalização sobre adições minerais no concreto.

1.3 Apresentação

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos sendo este apresentado a título de introdução.

No segundo capítulo está apresentada a revisão bibliográfica, com os aspectos históricos do uso da escória de alto-forno, a sua produção com a explicação da atividade hidráulica e as alterações nas propriedades do concreto. São apresentadas as considerações normativas do produto escória, bem como da sua utilização como adição no concreto. Também são apresentados aspectos relativos a conservação ambiental, proporcionada pelo uso da escória de alto-forno.

O terceiro capítulo, materiais e métodos, trata dos materiais empregados no estudo e as suas caracterizações e a metodologia utilizada com a descrição dos ensaios experimentais realizados.

Os resultados e discussões são apresentados no quarto capítulo com as análises e discussões dos resultados dos ensaios do terceiro capítulo.

As conclusões deste trabalho de pesquisa são relatadas no quinto capítulo. A bibliografia referenciada e os anexos são apresentados ao final deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico da utilização da escória de alto-forno

Antes de Aspdin registrar a patente do cimento Portland em 1824, o conhecimento da capacidade aglomerante da escória granulada de alto-forno apresentava divergência entre os autores sobre o início de sua utilização.

Em 1774, Lorient comentou sobre o poder aglomerante de escórias misturadas com cal hidratada (MATHER, 1957).

VICAT (1818) *apud* BATAGIN e ESPER (1988) observando a similaridade da composição entre a escória e o clínquer,⁽²⁾ previu a sua utilização como aglomerante.

Outros autores já haviam observado que, em 1862 o alemão Eugene Langen utilizou pela primeira vez a granulação da escória para facilitar a sua eliminação e manipulação na saída do alto-forno. Com o resfriamento rápido realizava-se a granulação da escória que, moída posteriormente e misturada com cal, produzia um ligante hidráulico (VENUAT, 1976).

⁽²⁾ Clínquer: Produto parcialmente fundido em forno e que é moído para produzir o cimento.

JOHN, VANDERLEY M. (1995), citou que, segundo Claret de Langavant, a capacidade aglomerante da escória foi descoberta somente em 1880.

Entretanto, o primeiro cimento Portland comercializado surgiu na Alemanha em 1882, desenvolvido por PRUSSING com a moagem conjunta de clínquer e escória (BATAGIN e ESPER, 1988).

Após longos anos de ensaio, o Governo Alemão autorizou em 1909 a produção de cimento com adição de 30% de escória e em 1917 com adição de 70% de escória (VENUAT, 1976).

VENUAT (1976), citou que após a Primeira Guerra Mundial utilizou-se grande quantidade do cimento alemão com 70% de adição de escória, com sucesso. Antes da 2ª Guerra Mundial, os cimentos de escória só eram conhecidos nas regiões próximas às usinas siderúrgicas, onde as fábricas de cimento eram construídas pelas próprias siderúrgicas para a utilização da escória. Depois da guerra, os poderes públicos preconizaram o uso da escória por razões econômicas, para restringir o uso do carvão nas indústrias de cimento. Progressivamente, o carvão foi substituído pelo óleo combustível e, novamente, em 1974, os poderes públicos intervieram em favor da escória devido à crise do petróleo e o aumento do seu preço.

Até 1950 a utilização da escória desenvolveu-se lentamente devido à concorrência com o cimento Portland sem adição, considerado material nobre, e principalmente pelo desconhecimento das propriedades reais dos cimentos com escória. Após 1950, graças a esforços de divulgação e informação, o cimento com escória desenvolveu-se em diversos países (VENUAT, 1976).

Em 1952, no 2º Congresso Internacional de Química do Cimento realizado em Londres, KIEL (1952) *apud* JOHN, VANDERLEY M. (1995), citou que o crescimento na produção do cimento com escória foi devido ao interesse em reduzir o consumo de

carvão, o calor de hidratação em concreto massa e a elevada resistência às águas sulfatadas, como a do mar.

A utilização da escória de alto-forno não está ligada apenas à produção de cimento com clínquer ou com cal. Em 1960, a antiga União Soviética começou a produzir em uma planta piloto um cimento de escória ativada com compostos alcalinos, (provavelmente o silicato de sódio sem adição de clínquer). Em 1964, começou a produção em escala industrial. Em 1980, este cimento foi normatizado, e passou a ser produzido com resistências variadas (100 MPa a 125 MPa) (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

2.2 Histórico brasileiro

O primeiro cimento produzido no Brasil foi em 1892, pelo Eng^o Louis Nóbrega, por um período de três meses. Várias outras tentativas ocorreram sem sucesso. No ano de 1926 foi inaugurada no Brasil a Companhia Brasileira de Cimento Portland, na cidade de Perus, no Estado de São Paulo. Esta data foi um marco para indústria brasileira de cimento. Nesta época, o Brasil produzia 13 mil toneladas anuais de cimento e importava 400 mil toneladas. Em 1929, o Brasil já produzia 96 mil toneladas de cimento.

Segundo ARI TORRES (1941) *apud* JOHN, VANDERLEY M., (1995), propôs para as discussões futuras no âmbito da ABNT três categorias de aglomerantes obtidos pela mistura de escória com cal hidratada sem clínquer: (1) “aglomerante de escória com cal” para misturas com mais de 70% de cal; (2) “cal metalúrgica” para teores de escória menores que 70%; e (3) cimento metalúrgico sulfatado que deveria conter escória, sulfato de cálcio, cal ou cimento Portland.

Não existe qualquer registro da produção comercial de qualquer um destes cimentos no Brasil (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

No Brasil, a fabricação do cimento com escória foi iniciada em 1952, com 72 mil toneladas pela Cimento Tupi S.A, em Volta Redonda no Estado do Rio de Janeiro, utilizando 30% de escória proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional e em 1954, o teor foi aumentado para 50% (BATAGIN e ESPER,1988).

Em 1977, foi admitido o uso de até 10% de escória no cimento Portland comum através da NBR 5732, antiga EB-1, e em 1991 foi normatizado o cimento Portland de alto-forno.

2.3 A produção da escória de alto-forno

A escória granulada de alto-forno é um sub-produto da fabricação do gusa nos altos-fornos, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio na forma vítrea. A fusão da ganga⁽³⁾ do minério de ferro e dos fundentes⁽⁴⁾ através de reações químicas formam a escória. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem secundariamente a formação de sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês (BATAGIN e ESPER,1988; JACOMINO *et al.* 2002).

Todas as impurezas contidas no minério de ferro e nos combustíveis, coque ou carvão vegetal passam para a escória de alto-forno. As impurezas podem resultar numa mistura com ponto de fusão muito alto, tornando o processo antieconômico.

⁽³⁾Ganga: minério de ferro+impurezas.

⁽⁴⁾Fundentes: coque ou carvão vegetal.

Agentes fundentes são adicionados na carga do alto-forno de modo que a composição química resultante das impurezas fique dentro de uma região bem definida no diagrama de fases SiO_2 – CaO – Al_2O_3 ⁽⁵⁾ (diagrama de RANKIN) apresentado na Figura 2.1.

O diagrama de RANKIN apresenta as diversas adições considerando as diferentes composições químicas das escórias. Estas diferenças serão tratadas com mais detalhes nos próximos capítulos.

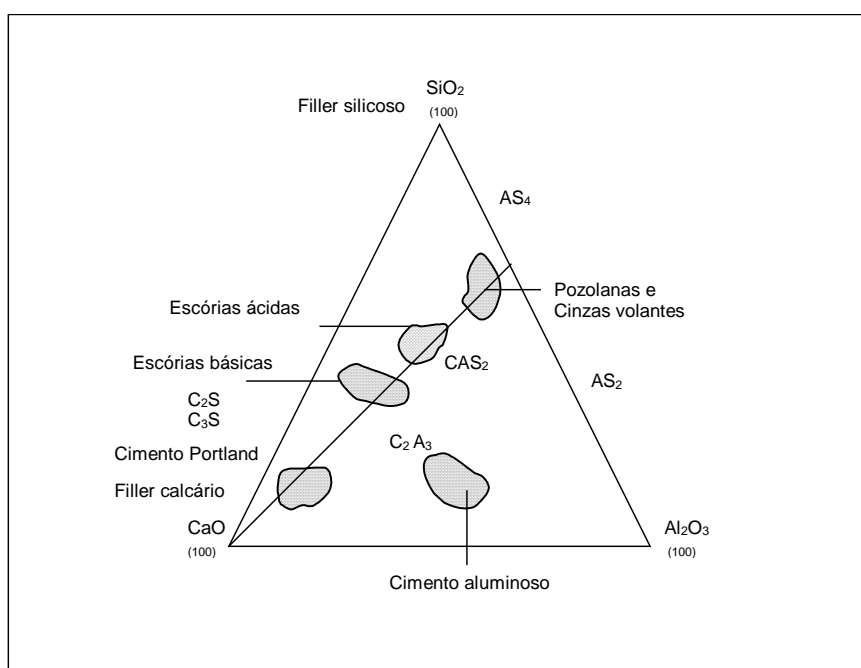


Figura 2.1 - Posição das escórias no diagrama clássico de RANKIN
(BATAGIN e ESPER, 1988)

Desta forma, do ponto de vista químico, a escória tem uma composição muito constante que deve ser observada pelos metalurgistas, pois desvios no processo causam demandas significativas de energia e custos adicionais.

⁽⁵⁾ SiO_2 – CaO – Al_2O_3 – dióxido de silício total – óxido de cálcio total – óxido de alumínio.

Isto faz com que a escória de alto-forno tenha estabilidade em suas propriedades, garantindo confiabilidade para a utilização como adições minerais em concreto (AİTCIN, 2000).

2.3.1 Alto-forno à carvão vegetal e à coque

Os combustíveis utilizados no alto-forno podem ser o carvão vegetal e o coque. Apesar de ambos serem fontes de carbono, existem diferenças básicas entre os processos, como por exemplo, a origem do carvão vegetal e do coque. O carvão vegetal é proveniente da carbonização da madeira com um teor de carbono fixo (entre 56% e 75%) e o coque é proveniente do carvão mineral com teor de carbono fixo em torno de 88% (JACOMINO *et al.*, 2002).

As diferenças entre as propriedades do carvão vegetal e do coque fazem com que os altos-fornos também tenham as suas diferenças, como por exemplo, o tamanho.

O uso do carvão vegetal limita o tamanho do forno porque este produto não suporta altas pressões de carga. A indústria siderúrgica se caracteriza por elevada economia de escala. Desta forma, este fator técnico favorece a siderúrgica à coque. Em contrapartida, o coque tem que ser importado, pois o carvão nacional não apresenta qualidade satisfatória (SOARES, 1982).

A Tabela 2.1 apresenta as principais diferenças entre o alto-forno à carvão vegetal e à coque e a Figura 2.2 apresenta esquematicamente um alto-forno.

Tabela 2.1 - Dados comparativos entre o alto-forno à carvão vegetal e o alto-forno à coque (JACOMINO *et al.*, 2002)

Descrição	Coque	Carvão vegetal
Produção	2000 a 12000 t/dia	40 a 1200 t/dia
Diâmetro do cadinho	8 a 14 m	1,5 a 6 m
Altura do forno	~32 m	~ 16 m
Produtividade	> 2 t/dm ³	1,6 a 2 t/dm ³
Volume de escória	250 a 300 Kg/t de gusa	100 a 150 Kg/t gusa
(CaO/SiO ₂) da escória	>1	<1

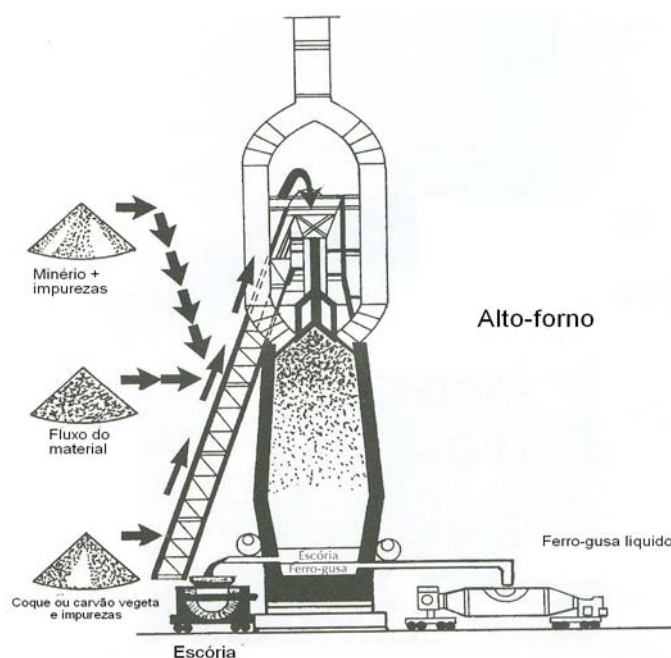


Figura 2.2 - Representação esquemática de um alto-forno (JACOMINO *et al.*, 2002)

Observa-se na Figura 2.2 que, no cadinho situado na parte inferior do forno, dois líquidos separam-se por diferentes densidades: o gusa com densidade acima de 7 g/cm³ e a escória com densidade mais baixa, cerca de 2,8 g/cm³. Desta forma, a escória flutua no topo do ferro-gusa e pode ser drenada separadamente em intervalos regulares.

2.3.2 Resfriamento das escórias

A importância de analisar o resfriamento das escórias deve-se ao fato de que a sua atividade hidráulica depende de vários fatores, dentre eles, o sistema de resfriamento.

Existem basicamente três tipos de resfriamento da escória na saída do alto-forno: resfriamento ao ar, escória expandida e escória granulada.

A *escória resfriada ao ar* é formada pelo resfriamento lento da escória num poço ao ar livre.

A *escória expandida* é obtida pelo rápido vazamento da escória fundida em poços de paredes inclinadas, molhadas no fundo, que permite que o vapor penetre na escória quando líquida.

A *escória granulada* é obtida pelo resfriamento rápido da escória líquida numa estrutura química vitrificada. Jatos de água em alta pressão são lançados diretamente na saída da escória fundida. A escória e a água são misturadas na razão de uma parte de escória para de seis a dez partes de água (dependendo da situação, a quantidade de água aumenta, podendo chegar a uma parte de escória para dez partes de água).

Para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve estar no estado amorfo, ou seja, deve ser resfriada rapidamente desde o estado líquido a 1500°C até a temperatura de 200 °C, evitando associações dos átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato este conhecido como cristalização. A ação de resfriamento brusco da escória líquida é denominado granulação (JACOMINO *et al.*, 2002).

A Figura 2.3 apresenta esquematicamente a granulação da escória, onde a escória em fusão cai sobre uma roda dentada que projeta pequenos grãos, resfriada por meio de jato d'água.

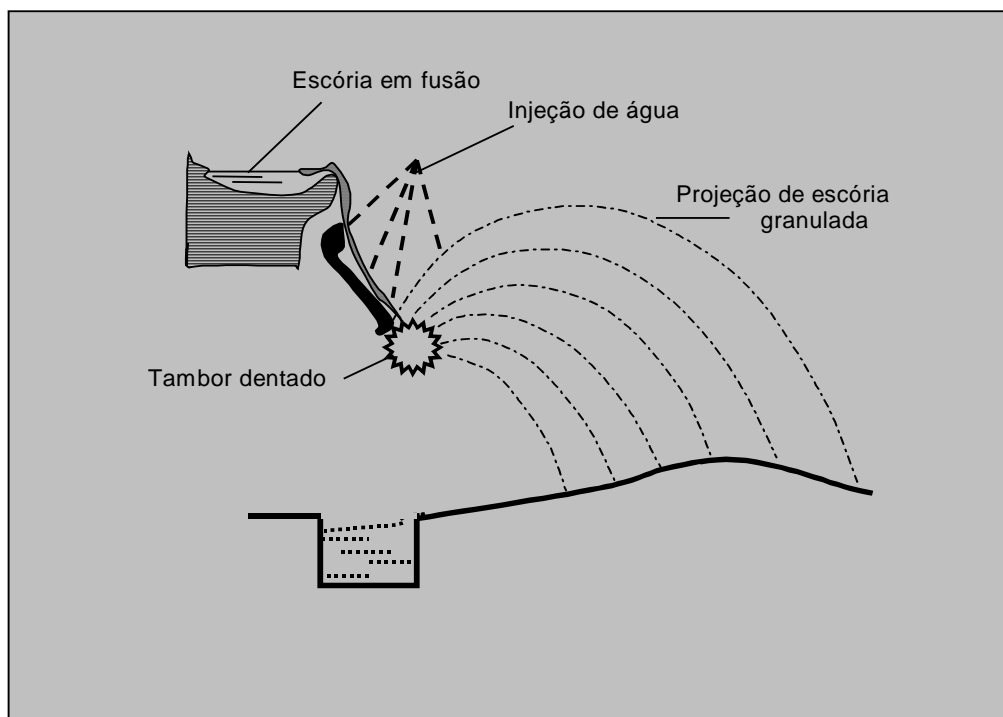


Figura 2.3 - Granulação da escória (JACOMINO *et al.*, 2002)

Neste estudo analisaremos as escórias com propriedades hidráulicas para uso como adição em concreto, especificamente a escória granulada. As escórias cristalinas resfriadas ao ar apresentam atividades hidráulicas baixas, fugindo ao interesse do estudo.

2.4 Especificações normativas para escória de alto-forno

O Brasil não possui uma norma específica para as escórias de alto-forno. As especificações das escórias são baseadas nas normas de cimento Portland e o uso como adição mineral está citado na norma de controle tecnológico do concreto NBR 12654 (ABNT, 1992).

As normas brasileiras definem as escórias de alto-forno como básicas ou ácidas pela sua composição química. Para utilização como adição mineral só podem ser utilizadas escórias básicas. As escórias que não atendem os requisitos normativos são classificadas como escórias ácidas e são tratadas como pozolanas, devendo atender a outras especificações.

A NBR 12654 (ABNT, 1992) é a norma brasileira que fixa as condições exigíveis para o controle tecnológico dos materiais componentes do concreto. Na versão de 1992 (item 4.5) consta a adição mineral, que por definição:

Item 4.5 - Para efeitos desta Norma são consideradas as adições minerais de natureza hidráulica latente (escória básica de alto-forno que atende a NBR 5735 (ABNT, 1991)), pozolânica (materiais pozolânicos naturais ou artificiais que atendem as prescrições da NBR 5736 (ABNT, 1991)) ou inertes (pigmentos de óxidos metálicos destinados a colorir integralmente o concreto com o objetivo estético).

As adições só podem ser incorporadas ao concreto produzido em central e só podem ser usadas em concreto com base nos subsídios decorrentes de estudos experimentais prévios.

A classificação da escória é feita de acordo com o texto da NBR 5735 (ABNT, 1991) citado na NBR 12654 (ABNT, 1992).

No item 3.3 - *Escória granulada de alto-forno*, a mesma deve obedecer na sua composição química⁽⁶⁾ a relação: $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$ ⁽⁷⁾. Esta é a única exigência da norma para a utilização da escória de alto-forno como adição mineral ao concreto. Se esta relação é atendida, a escória é classificada como básica, caso contrário é classificada como ácida.

SOARES (1982), ensaiou 13 amostras de escória de alto-forno à carvão vegetal e verificou que 11 amostras atendiam a relação proposta na norma.

Portanto, as escórias de alto-forno à carvão vegetal que atendem as exigências da NBR 5735 (ABNT,1991), são classificadas como escórias básicas e podem ser utilizadas como adição mineral.

SMOLCZYK (1980), considerava que a basicidade não era suficiente para avaliar uma escória, podendo as escórias ácidas serem utilizadas como aglomerante.

SOARES (1982), apresentou uma interpretação diferente para esta análise. Uma escória é considerada básica quando a relação $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1$, e ácida quando a relação $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$. Considera-se que um teor elevado de óxido de alumínio (Al_2O_3) pode neutralizar a acidez, deixando a escória com características básicas. A relação CaO/SiO_2 é denominada *índice de basicidade*. A relação $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$ representa o *índice de hidraulicidade*. Se este índice for igual ou maior que um (≥ 1), a escória possui atividade hidráulica suficiente para ser usada na produção de cimento Portland de alto-forno e como adição no concreto. E se for menor que um (< 1), pode-se verificar se a escória apresenta características de pozolanicidade que permitam a sua utilização na fabricação de cimento Portland pozolânico.

Por meio de módulos químicos, diversos autores tentaram correlacionar a composição química das escórias com a resistência mecânica. Este fato resultou o motivo de vários países apresentarem em suas especificações para cimento Portland

⁽⁶⁾ Composição química da escória é a basicidade.

⁽⁷⁾ $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ – óxido de cálcio – óxido de magnésio – dióxido de silício total – óxido de alumínio.

de alto-forno exigências quanto a composição química das escórias de forma tão divergente (BATAGIN e ESPER,1988).

O fato de vários autores adotarem a relação CaO/SiO_2 para o *índice de basicidade*, classificou a escória de alto-forno como ácida. O que não representa a verdade da atual norma brasileira NBR 5735 (ABNT,1991), (JACOMINO *et al.*, 2002).

Convém ressaltar que a quantidade de adição de escória de alto-forno permitida no concreto não é normatizada. Neste caso, estudos experimentais prévios são de extrema importância.

A quantidade de adição de escória de alto-forno está limitada em 70% para o cimento CP III na NBR 5735 (ABNT, 1991) e para cimentos compostos tipo CP II E a NBR 11578 (ABNT,1991) limita a adição de escória de alto-forno de 6% a 34%.

Neste estudo, o teor máximo adicionado de escória de alto-forno foi de 70%, visando atender integralmente as condições da norma, inicialmente classificando a adição de escória (ácida ou básica) e a possibilidade de ser adicionada em centrais de concreto mediante estudos prévios.

2.5 Hidraulicidade das escórias

A atividade hidráulica da escória granulada de alto-forno à carvão vegetal ou à coque, depende de vários fatores, como a composição química, o grau de vitrificação, o resfriamento, a estrutura cristalina, a composição mineralógica, a granulometria, a superfície específica, a microheterogeneidade e os defeitos superficiais (MARQUES,1994).

Ressalta-se que a composição química e o grau de vitrificação são os fatores de que mais dependem a atividade hidráulica das escórias (BATAGIN e ESPER, 1988).

2.5.1 Composição química das escórias

A composição química das escórias está relacionada à homogeneidade da escória líquida, a sua elevada capacidade de dessulfuração e a baixa viscosidade.

Diversos autores correlacionaram a composição química das escórias com o desenvolvimento das propriedades hidráulicas. Resulta daí o fato da composição química ser adotada como o método mais usual. Em linhas gerais, quanto mais básica, mais hidráulica será a escória (MARQUES, 1994).

Na Tabela 2.2 estão indicadas as variações dos elementos constituintes das escórias citadas na literatura: as escórias de alto-forno à coque e as escórias de alto-forno à carvão vegetal (CINCOTTO *et al.*, 1992; SOARES, 1982).

Tabela 2.2 Composição química da escória de alto-forno, em porcentagem
(CINCOTTO *et al.*, 1992; SOARES, 1982)

Constituintes	Teores indicados na literatura	Escórias de alto-forno à coque	Escórias de alto-forno à carvão vegetal
SiO ₂	23-55	30-35	24-39
CaO	27-55	40-45	38-55
Al ₂ O ₃	5-25	11-18	8-19
MgO	2-12	2,5-9	1,5-9
Fe ₂ O ₃	-	0-2	0,4-2,5
FeO	0,5-2	0-2	0,2-1,5
S	0,4-1,2	0,5-1,5	0,03-0,2

2.5.2 Grau de vitrificação das escórias de alto-forno

O estado não cristalino da escória representa uma condição necessária para a atividade hidráulica (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

Escórias com a mesma composição química podem apresentar atividades hidráulicas diferentes, conforme o processo de resfriamento adotado (VENUAT, 1976; SMOLCZYK, 1980). Estas técnicas de resfriamento foram apresentadas no item 2.3.2.

2.5.3 Reatividade das escórias de alto-forno e a sua relação com a composição química e o estado vítreo

A escória resfriada ao ar, com estrutura cristalina, não apresenta propriedades hidráulicas. Este processo de resfriamento é bastante utilizado nas siderúrgicas com alto-forno à carvão vegetal que, por estratégia de mercado, não realizam a granulação da escória.

Apenas o C_3S e o $C_2S^{(8)}$ possuem atividade hidráulica em escórias com estruturas cristalinas. Estes componentes são raramente encontrados nas escórias utilizadas como adição, pois a faixa da variação da composição química não viabiliza a formação destes silicatos (MARQUES, 1994).

Os componentes mineralógicos das escórias denominados melilitas (akermanita e gehlenita) e a merwinita são características de escórias básicas assim como a wollastonita e a anortita são características das escórias ácidas (BATAGIN e ESPER, 1988).

⁽⁸⁾ C_3S : alita e C_2S : belita.

As escórias de composição melilítica resfriadas rapidamente são as que potencialmente apresentam as melhores propriedades hidráulicas.

Escórias vítreas, quimicamente idênticas às escórias cristalinas, hidratam-se rapidamente em meio aquoso alcalino. Entretanto, não são todas as escórias vítreas que são reativas. Este fato deve-se a polimerização, que é a ligação dos tetraedros de SiO_4^{4-} através de íons oxigênio, gerando novas estruturas dos silicatos. Resumindo, quanto maior a polimerização, mais estável será a estrutura do silicato e, por consequência, menor reatividade.

Conclui-se que a hidráulidade das escórias depende, principalmente, da composição química e de seu grau de vitrificação que são usados como método de previsão de hidráulidade (BATAGIN e ESPER, 1988).

A Tabela 2.3 apresenta uma série de minerais possíveis de serem encontrados nas escórias resfriadas ao ar.

Tabela 2.3 Componentes mineralógicos das escórias (BATAGIN e ESPER, 1988)

Denominação	Fórmula química simplificada	Atividade hidráulica	Observações
Akermanita	C_2MS_2	ausente	Componente principal de escórias básicas
Gehlenita	C_2AS	ausente	Componente principal de escórias básicas
Merwinita	C_3MS_2	ausente	Componente secundário ou principal de escórias básicas
Monticelita	CMS	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Wollastonita	CS	ausente	Componente principal de escórias ácidas
Forsterita	M_2S	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Enstatita	MS	ausente	Componente secundário de escórias ácidas
Espinélio	MA	ausente	Componente secundário de escórias ácidas
Anortita	CAS_2	ausente	Componente principal de escórias ácidas
Rankinita	C_3S_2	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Alita	C_3S	presente	Ausente nas escórias granuladas de AF, presentes nas escórias de aciaria e clínquer
Belita	C_2S	presente	Ausente nas escórias granuladas de AF, presentes nas escórias de aciaria e clínquer

2.6 Avaliação da atividade hidráulica das escórias de alto-forno

Os métodos para previsão da hidraulicidade das escórias podem ter por base a composição química (através do emprego de módulos químicos), a microestrutura (através da verificação do grau de vitrificação por difratometria de raios-X ou microscopia) e pela sua própria hidratação (através do ensaio acelerado com soda).

Estes métodos têm por objetivo controlar a qualidade da escória quando utilizada como adição no cimento e a fabricação deste cimento.

Os métodos preconizados como sendo os melhores, diferem-se conforme a origem das escórias. Alguns destes métodos, aplicados em determinadas escórias provenientes de um alto-forno, não podem ser extrapolados para outro tipo de escória (VENUAT, 1976).

Para BATAGIN e ESPER (1988), os ensaios de resistência mecânica são os mais seguros e definitivos para a verificação das propriedades hidráulicas das escórias, como por exemplo, o *Método Comparativo de Feret*, que tem por base a comparação da resistência à compressão de argamassas constituídas de diversas misturas de cimento e escória, em diferentes idades com os mesmos cimentos (a escória é substituída por igual porcentagem de um inerte (quartzo)).

Os métodos mecânicos são os mais demorados, mas os mais precisos. A seguir serão apresentados outros métodos mais rápidos de avaliação.

2.6.1 Método visual

As escórias devem ser apresentadas em forma de grãos porosos, com alguns milímetros de dimensão e com aspecto ligeiramente porcelânico. Não devem ser espumosas, não conter muita água e não ser friável a mão. É preferível que sejam claras (cor de mel), embora algumas impurezas possam colori-las de azul. Escórias muito escuras não são interessantes por serem provenientes de alto-forno de processo frio.

O exame à luz de Wood consiste em iluminar a escória com raios ultravioletas para determinar a fluorescência⁽⁹⁾. Uma escória com fluorescência rósea é considerada de boa qualidade e a azul ou preta de má qualidade. Esses ensaios, entretanto, apresentam deficiências e freqüentemente tem resultados pouco significativos (VENUAT, 1976).

2.6.2 Método com base na composição química

Por meio de módulos químicos, diversos autores tentaram correlacionar a composição química das escórias (basicidade) com a resistência mecânica, conforme descrito no item 2.5.1. Muitos países apresentaram em suas especificações exigências quanto a composição química das escórias, conforme apresentado na Tabela 2.4, (BATAGIN e ESPER, 1988).

⁽⁹⁾ Fluorescência: luminescência provocada pela conversão, em corpo, de alguma forma de energia em radiação visível.

Tabela 2.4 Especificação quanto à composição química das escórias
(BATAGIN e ESPER, 1988)

País	Especificação
Alemanha e Espanha	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$
Japão	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1,4$
França (não normalizado)	$(\text{CaO}/\text{SiO}_2) > 1$
Estados Unidos	$(\text{CaO}/\text{SiO}_2) > 1$
Alemanha	$(\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2 + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3) > 1$
Brasil	$I = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 > 1$

Em geral, estas fórmulas não podem ser correlacionadas com as resistências em todas as idades. Para VENUAT (1976), a relação CaO/SiO_2 é correlacionável com as resistências nas idades de 2 e 7 dias e a relação $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ é correlacionável com as resistências na idade de 28 dias ou mais.

A composição química não permite assegurar a qualidade da escória. É necessário também que ela seja bem resfriada.

2.6.3 Métodos baseados na microestrutura

Os métodos usuais utilizados na previsão da hidraulicidade das escórias baseados na microestrutura são a difratometria de raios-X e a microscopia ótica.

A técnica da difratometria de raios-X baseia-se no fato que os raios-X são difratados pelos cristais, quando estes apresentam as distâncias interplanares do retículo do cristalino com a mesma grandeza dos comprimentos das ondas de raios-X (Lei de Bragg).

No difratograma de raios-X, os raios caracterizam as diferentes distâncias interplanares e, por consequência, o estado cristalino da amostra, identificando os componentes mineralógicos.

As escórias, sendo constituídas por material vítreo, não apresentam raios de difração, observando-se bandas que caracterizam o estado amorfo. As falhas do processo de resfriamento são detectadas com a presença de raios que caracterizam estágios de cristalização.

As principais fases mineralógicas possíveis de serem identificadas, como por exemplo, a melilita, a nortita, etc, são função da composição química e fornecem indicações do grau de basicidade das escórias.

A microscopia pode fornecer importantes informações da natureza da escória como o grau de vitrificação, a morfologia, a coloração, etc.

A avaliação do grau de vitrificação por meio de microscópio polarizador é rápida e simples. As escórias mais vítreas são as mais hidráulicas, devido à fase vítrea corresponder a um estado amorfo, estruturalmente desordenado e termodinamicamente instável (MARQUES, 1994).

O teste de *Michelsen* permite avaliar a escória através da sua reatividade com solução aquosa, diluída em sulfato de alumínio, com formação de cristais de gipsita. Quanto mais rápida a cristalização das espículas de gipsita, sob o microscópio, mais reativa será a escória (BATAGIN e ESPER, 1988).

2.6.4 Método baseado na própria hidratação

Entre os vários métodos utilizados para a verificação do comportamento hidráulico das escórias de alto-forno, o ensaio acelerado é o mais valioso para a previsão do desempenho mecânico.

O *Método Acelerado de Feret* possibilita uma avaliação rápida do desempenho mecânico de uma escória de alto-forno. Estudos realizados por BATAGIN e ESPER (1988), demonstraram uma boa correlação entre as resistências mecânicas à compressão, tanto dos ensaios acelerados como dos normais.

2.6.5 A escória de alto-forno como aglomerante

As características, peculiaridades e efeitos quando adicionados aos cimentos ou como adição mineral no concreto, fazem com que as escórias gerem mudanças nas propriedades do concreto.

A minimização da reação expansiva álcali-agregado, a diminuição da permeabilidade, o aumento da resistência aos sulfatos, a diminuição da retração por secagem, a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência mecânica à compressão em idades avançadas, a diminuição da resistência à compressão nas primeiras idades, o aumento da resistência à tração e outras mudanças são citadas por BATAGIN e ESPER (1988).

São necessárias algumas considerações sobre o mecanismo de ativação das escórias e sobre os produtos de hidratação formados para o entendimento das mudanças nas propriedades do concreto.

As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, endurecendo quando misturadas com água. As reações de hidratação das escórias são tão lentas, que limitaria a sua aplicação comercial, se os ativadores não acelerassem o processo de hidratação.

De maneira geral, os ativadores não podem ser considerados como catalisadores por não participarem das reações. O termo catalisador está atualmente consagrado (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

Segundo REGOURD (1986) *apud* JOHN, VANDERLEY M.(1995), a ativação química da escória pode ser classificada em três tipos: química, mecânica e térmica.

A ativação mecânica é obtida pela moagem da escória, de maneira a obter superfícies específicas elevadas. Isto ocorre porque a velocidade de dissolução depende da área de contato da solução e a ativação térmica é obtida pela elevação da temperatura da solução escória e água.

As duas formas apresentadas têm limitadas as suas aplicações isoladamente, devido aos altos custos operacionais para viabilizar o processo.

A ativação química, de maior interesse prático se dá pela combinação de dois fatores: a elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH e pela antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados, devido ao aumento da concentração de íons na solução já no início do processo, pela dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

Os ativadores químicos mais comuns são a cal hidratada, os sulfatos de cálcio hidratados como a gipsita, o hemidrato e a anidrita, os hidróxidos de metais alcalinos como KOH e NaOH⁽¹⁰⁾, os silicatos de sódio e potássio, o cimento Portland ou mesmo a mistura destes compostos.

⁽¹⁰⁾ KOH: hidróxido de potássio e NaOH: hidróxido de sódio.

Como citado anteriormente, são diversas as propriedades do concreto alteradas devido ao uso da escória de alto-forno. Serão apresentadas a seguir considerações sucintas das propriedades analisadas neste estudo sobre o concreto no estado fresco e endurecido.

As considerações apresentadas são de pastas de cimento ou concreto produzido com adição de escória de alto-forno na fabricação do cimento. Neste estudo, a escória está sendo analisada como adição mineral no concreto. Entende-se que as mesmas são válidas, pois a forma de mistura do concreto dentro da betoneira é a única variável no processo. Diversas outras adições utilizadas e consagradas na tecnologia do concreto, como por exemplo, a sílica ativa, o metacaulim e as pozolanas são adicionadas diretamente nas centrais de concreto para atender determinadas propriedades específicas.

2.6.5.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica é uma das mais importantes propriedades do concreto. Estudos comparativos entre pastas de cimento Portland com adição de escória e sem adição de escória apresentaram resistências iniciais menores devido à hidratação mais lenta das escórias em relação ao clínquer. Por outro lado, as resistências em idades avançadas são maiores por apresentarem menor porosidade capilar (BATAGIN e ESPER, 1988; METHA e MONTEIRO 1994).

Estudos realizados por BRAVO (2000), com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal na Argentina, apresentaram o mesmo comportamento de queda da resistência em idades iniciais igualando-se com o concreto sem adição aos 90 dias.

2.6.5.2 Módulo de elasticidade

As características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do comportamento não linear do concreto, é necessária uma estimativa do módulo de deformação, que é a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional, adotado para determinar as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais. O módulo de elasticidade também é utilizado para calcular as tensões de projeto sob carga em elementos simples, momentos e deformações em estruturas (METHA e MONTEIRO 1994).

Segundo MARQUES (1994), o módulo de elasticidade é pouco influenciado pela porcentagem de escória adicionada ao cimento.

2.6.5.3 Trabalhabilidade

O componente físico mais importante da trabalhabilidade é a consistência, termo aplicado ao concreto fresco, que traduz as propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionada à mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, tendo em vista a uniformidade do concreto e o bom rendimento da execução (SOBRAL, 1983).

Em igualdade de condições, a trabalhabilidade do concreto com adição de escória de alto-forno é ligeiramente melhor em vista da ação lubrificante proporcionada pelas partículas de escória de alto-forno. Apesar de suas formas angulosas, os grãos de escória apresentam superfícies lisas e limpas, com planos de deslizamento que favorecem a plasticidade. No concreto fresco, as partículas de escória apresentam um

comportamento semelhante aos agregados muito finos, pois a sua hidratação é lenta e este fato melhora a sua trabalhabilidade (BATAGIN e ESPER, 1988).

Na produção de concreto, verificou-se que as diferenças encontradas nas pastas e argamassas se diluem, devido ao próprio consumo de cimento no concreto influenciar a trabalhabilidade. Ensaio de laboratório com pastas e argamassas apresentaram divergências nos ensaios com adição de escória no cimento, pelo fato de que estes ensaios na pasta mediram a viscosidade, enquanto que ensaios de abatimento foram influenciados pela capacidade de lubrificação da pasta (BATAGIN e ESPER, 1988).

2.6.5.4 Tempo de pega

A utilização de escória em concreto atua como retardador do tempo de pega (MALHOTRA, 1986).

O nível de substituição de escória por cimento é o principal fator que influencia os tempos de endurecimento. A relação água/cimento tem uma influência bem menos significativa sobre o tempo de pega (SWAMY, 1998).

Os tempos de pega em concretos com adição de escória podem ser abreviados com moagem maior do aglomerante, aumentando a finura, com a adição de um teor mais elevado de gesso ou com aditivos aceleradores (VENUAT, 1976).

2.6.5.5 Exsudação

Entende-se por exsudação a tendência de parte da água de amassamento do concreto no estado fresco percolar por capilaridade até a superfície do concreto. Este

fenômeno é manifestado pela impossibilidade do aglomerante fixar na sua hidratação toda a água requerida para a plasticidade necessária do concreto.

Dentre as causas da exsudação estão a finura do aglomerante, a granulometria dos agregados, o teor de água no concreto, as condições atmosféricas, entre outras.

Para BATAGIN e ESPER (1988), a maior finura dos aglomerantes com adição de escória de alto-forno, para compensar a taxa mais lenta de hidratação das escórias, é uma das causas que podem gerar a mesma exsudação entre aglomerantes com e sem escória de alto-forno.

2.6.6 Conservação ambiental

Um dos principais problemas enfrentados pelo setor siderúrgico relacionado à questão ambiental é a geração dos resíduos sólidos. A diversidade dos resíduos e a grande quantidade do volume gerado é a maior preocupação. Estes resíduos constituem uma fonte de poluição do solo, ar e água, caso não sejam dispostos adequadamente.

A utilização da escória de alto-forno reduz o aquecimento global em virtude da diminuição da produção do dióxido de carbono no processo de fabricação de cimento. O dióxido de carbono é gerado pela queima de combustíveis, para produzir as altas temperaturas necessárias na produção de clínquer.

O tratamento dos resíduos siderúrgicos vêm sendo discutido mundialmente. Diversos países, entre eles o Canadá, Japão, Finlândia, Austrália, estudam a criação de leis e normas técnicas para o gerenciamento e disposição dos produtos siderúrgicos, respeitando a individualidade de cada país. Entretanto, é consenso que cada siderúrgica deva concentrar esforços em todos os níveis na cooperação com os

governos, para reciclar e reutilizar seus produtos, especialmente as escórias de alto-forno (IISI, 1994).

A escória de alto-forno à carvão vegetal é um destes resíduos sólidos a serem tratados. Somente nas usinas independentes do Estado de Minas Gerais são gerados diariamente 3800 toneladas de resíduo. A escória representa 41% do total dos resíduos gerados (JACOMINO *et al.*, 2002).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 1987), a escória de alto-forno é classificada como resíduo classe III (resíduos inertes).

A prática de gerenciamento formada pela reutilização e reciclagem de resíduos é a mais adotada pelas indústrias de produção de ferro-gusa. Entretanto, não existem procedimentos definidos e permanentes que garantam o reaproveitamento contínuo e integral dos resíduos no mercado por parte de todas as empresas do setor, sendo a escória de alto-forno a melhor prática adotada.

Uma das vantagens citadas pelos metalurgistas para a utilização da siderurgia à carvão vegetal, em contrapartida aos resíduos gerados, é que o carvão vegetal é uma fonte de energia renovável e independente das importações.

A eucaliptocultura para o abastecimento das siderurgias à carvão vegetal possuem 1,5 milhão de hectares de áreas reflorestadas. Embora, o carvão seja uma fonte renovável, novas pesquisas estão sendo realizadas para substituí-lo.

Uma das alternativas apresentadas por pesquisadores brasileiros na Biomass and Bioenergy Conference, em Charleston, nos Estados Unidos, em novembro de 2004, foi a utilização do capim-elefante. A utilização do capim-elefante possibilitará o aumento do potencial de produção de carvão de 60% a 100% por hectare, devido a redução do ciclo plantio – colheita em comparação com o eucalipto (O Estado de São Paulo, 2005a).

Segundo MAZZARELLA *et al.* (2004), o rendimento econômico do capim-elefante é de US\$ 3,00/Gcal contra US\$ 16,00/Gcal do eucalipto, considerando o barril de petróleo a US\$ 42,00.

A Figura 2.4 apresenta o capim-elefante in-natura, após o processamento e o carvão gerado.



Figura 2.4 - Capim-elefante (MAZZARELLA *et al.*, 2004)

Para as empresas do setor, a escória de alto-forno encontra diversos usos, entre as quais se incluem as vendas para as indústrias cimenteiras, a doação para as prefeituras para a pavimentação das estradas e a recirculação no próprio forno (JACOMINO *et al.*, 2002).

Como a maioria das siderúrgicas com alto-forno à carvão vegetal utiliza o resfriamento ao ar, gerando escória sem atividade hidráulica, o setor agrega menor valor ao produto, inviabilizando o uso como adição mineral.

Algumas siderúrgicas à carvão vegetal entendem que a utilização da escória como substituto do cimento Portland no concreto não é vantajoso. A fabricação de cimento é de uso universal e de significativo market-share⁽¹¹⁾ para o caso da escória granulada de alto-forno (JACOMINO et al., 2002).

Contrariando esta visão, várias empresas, no Estado de Minas Gerais, foram viabilizadas com a moagem de escória de alto-forno para utilização como adição mineral no concreto, com venda direta para as centrais de concreto.

2.6.7 A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto

A utilização da escória de alto-forno como adição no concreto é uma prática adotada em diversos países.

NEVILLE (1982), apresentou o processo *Trief*, no qual a escória granulada moída com água é colocada diretamente na betoneira sob a forma de pasta juntamente com o cimento Portland e os agregados. Desta forma, elimina-se o processo de secagem da escória que possui alto custo. A moagem com água resulta em uma finura maior do que a seco com menor consumo de energia.

Outros processos existem na Inglaterra com a denominação de *Cemsave*, e na África do Sul de *Slagcement*. A escória moída seca com a mesma finura do cimento é colocada na betoneira em substituição à parte do cimento. Desta forma, o cimento Portland de alto-forno pode ser preparado na obra.

O concreto quer preparado com cimento Portland de alto-forno ou resultante da adição da escória de alto-forno em substituição à parte do cimento, tem resistências menores do que os preparados apenas com cimento Portland, mas posteriormente

⁽¹¹⁾ Market-share: fração do mercado.

conseguem resistências iguais nos dois casos. Verificou-se que a trabalhabilidade do concreto com adição foi maior, possibilitando a redução da relação água/aglomerante de um concreto com o mesmo teor de argamassa. Os concretos com adição apresentaram menor temperatura durante o processo de hidratação e o coeficiente de dilatação térmica reduziu em 10% (NEVILLE, 1982).

Nos Estados Unidos, a SCA – Slag Cement Association é uma entidade que representa as companhias responsáveis por 95% do consumo de escória de alto-forno moída. Seus membros são os maiores grupos cimenteiros do mundo. Seu objetivo é promover o uso e a aceitação do produto, criar as especificações, promover a compreensão do uso da escória de alto-forno moída com pesquisa e o desenvolvimento sustentável.

Em 2003 foram consumidas 3,1 milhões de toneladas de escória de alto-forno moída nos Estados Unidos para adição em concreto e aplicações em obras, gerando um aumento de 5,4% em relação a 2002 (SCA, 2005).

Este aumento de consumo gerou significativos benefícios ao meio ambiente como a redução na emissão de 2,7 milhões de dióxido de carbono, a economia de energia de 13,3 trilhões de BTUs e preservação de 4,6 milhões de toneladas de material da natureza (SCA, 2005).

A Figura 2.5 apresenta a evolução do consumo de escória de alto-forno moída nos Estados Unidos.

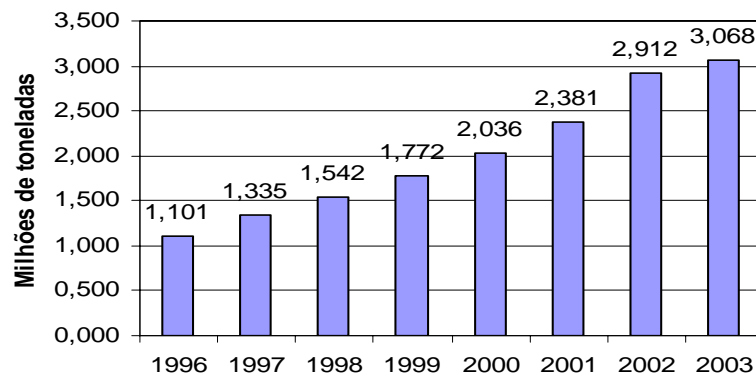


Figura 2.5 - Consumo de escória de alto-forno moída nas empresas associadas ao SCA nos Estados Unidos (SCA, 2005)

As obras produzidas com utilização da adição da escória de alto-forno em substituição ao cimento são de alta tecnologia. Com substituições de 25% a 40% de cimento, o projeto *Air Train JFK* em Nova York é um exemplo da utilização das escórias de alto-forno como adição no concreto, onde foram aplicados 182 mil metros cúbicos de concreto com adição de escória de alto-forno moída.

A Figura 2.6 apresenta a construção e a obra finalizada com escória de alto-forno em substituição ao cimento.



(a)



(b)

Figura 2.6 – (a) Construção do Air Train JFK e (b) obra finalizada, em New York (SCA, 2005)

A utilização da escória de alto-forno moída como adição no concreto nos moldes apresentados pelo mercado americano deve ser avaliada em algumas características para o mercado brasileiro.

As considerações feitas por JOHN, VANDERLEY M. (1995), de que o cimento brasileiro dificilmente atingiria valores menores que US\$ 100 por tonelada ocorreram em 2005, enquanto que a escória granulada aumentou de valores em torno de US\$ 10 por tonelada⁽¹²⁾ para valores de US\$ 20 a 30 por tonelada. Com os custos praticados em 1995, JOHN, VANDERLEY M. (1995), considerava que a utilização de ativadores ou a substituição do cimento era viável. Entretanto, nos dias de hoje, este fato deve ser avaliado criteriosamente.

Em 1995, para uma produção de 18 milhões de toneladas de ferro-gusa⁽¹³⁾ por usinas integradas à coque, foram produzidas 5 milhões de escória de alto-forno básica (à coque), onde 3 milhões foram incorporadas ao cimento. Em 2003, a produção de ferro-gusa aumentou para 22,5 milhões de toneladas para uma produção de escória de 6,7 milhões de toneladas (SINDIFER, 2005; MARQUES, 1994).

No entanto, a disponibilidade comercial da escória é inferior porque alguns contratos mais antigos estabelecidos antes das privatizações possuem cláusulas proibindo as siderúrgicas venderem o produto para terceiros (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

Após as privatizações, cresceu o interesse das siderúrgicas na criação de novos mercados, como, por exemplo, o da escória, aumentando o faturamento com a venda de resíduos e de reconhecimento social. Este mercado direcionado apenas para a indústria cimenteira tem o limitante do preço do clínquer.

⁽¹²⁾ Informações fornecidas ao autor por diferentes siderúrgicas brasileiras.

⁽¹³⁾ O termo em inglês para o ferro-gusa é Pig Iron.

Como alternativa tem-se a venda como adições no concreto diretamente para as concreteiras (MARQUES, 1994), como apresentado anteriormente no modelo norte-americano.

A escória de alto-forno à carvão vegetal pode interferir nesta análise. Em 1992, SOARES (1992), estimava a produção de escória à carvão vegetal em 800 mil toneladas. Em 2003, foi estimada uma disponibilidade de 1,4 milhões toneladas de escória produzida e, por serem raramente utilizadas pela indústria cimenteira, são fonte de matéria-prima disponível (SINDIFER, 2005; JOHN, VANDERLEY M., 1995).

A Tabela 2.5 apresenta a produção do ferro-gusa no Brasil nos últimos anos.

Tabela 2.5 Produção de ferro-gusa no Brasil por tipo de redutor empregado
(SINDIFER, 2005)

Ano	Carvão Vegetal		Coque	Total
	Usinas integradas	Gusa independente	Usinas integradas	
1984	3.005.412	3.483.553	10.744.429	17.233.394
1985	2.999.640	3.840.256	12.131.550	18.971.446
1986	3.129.050	4.512.350	12.618.396	20.259.796
1987	2.815.140	4.406.401	13.714.441	20.935.982
1988	3.117.043	4.683.460	15.622.786	23.423.289
1989	3.610.707	6.092.127	15.747.436	25.450.270
1990	2.902.300	5.642.603	12.957.700	21.502.603
1991	2.867.427	4.533.792	15.465.212	22.866.431
1992	2.757.748	4.383.373	16.217.635	23.358.756
1993	2.417.176	4.802.824	16.493.271	23.713.271
1994	2.455.161	5.446.839	17.057.316	24.959.316
1995	1.969.405	5.145.595	17.849.340	24.964.340
1996	1.667.612	4.359.388	17.951.149	23.978.149
1997	1.418.250	4.762.750	18.832.000	25.013.000
1998	1.467.895	4.960.105	18.683.000	25.111.000
1999	1.408.374	5.401.413	17.738.793	24.548.580
2000	1.253.782	6.145.377	20.323.476	27.722.635
2001	1.303.045	6.510.233	19.577.677	27.390.955
2002	1.294.184	6.759.890	21.595.610	29.649.684
2003	1.346.753	8.103.864	22.564.026	32.014.643

Em 1974, a produção nas siderúrgicas à carvão vegetal chegou a representar 51% da produção total de ferro-gusa. Esta percentagem foi reduzindo a níveis de 40% entre 1977 a 1981. As estimativas realizadas em 1982 eram de que a produção à carvão vegetal chegaria a 20% nos anos 90 (SOARES, 1982).

Em 2003, a produção do ferro-gusa à carvão vegetal foi de 29%, contrariando as projeções realizadas. Do ponto de vista da distribuição regional da produção de ferro-gusa à carvão vegetal, a concentração no Estado de Minas Gerais é extremamente significativa.

A produção no Brasil é realizada por um conjunto de empresas de tamanhos bastante diversificados. Os produtores independentes são as empresas que fabricam o ferro-gusa para vender às fundições nacionais e ao mercado externo. Em 2003, 86% do ferro-gusa foi produzido por produtores independentes. Sendo que a capacidade instalada para a produção de ferro-gusa é de aproximadamente 10 milhões de toneladas, distribuídas em 68 empresas com 128 altos-fornos instalados.

A disponibilidade de um aglomerante com menor preço, possibilitando a redução do custo da habitação, inclusive a popular, combinada com a idéia de preservação ambiental, contribuiria para a melhoria da imagem das siderúrgicas perante a sociedade (JOHN, VANDERLEY M., 1995).

Com a aquisição das maiores concreteiras brasileiras pelas indústrias de cimento nos últimos 5 anos, a venda direta da escória para as concreteiras foi prejudicada devido aos interesses comerciais dos dois setores (siderúrgico e cimenteiro).

A relação das empresas produtoras de ferro-gusa, e a capacidade de cada uma delas estão apresentadas no Anexo A, ao final deste trabalho de pesquisas.

2.6.8 A questão normativa para adição de escória de alto-forno no concreto

No item 2.4 foram apresentadas as especificações normativas para o produto escória de alto-forno. Verificou-se que as escórias de alto-forno à coque são classificadas como escórias básicas e que as escórias de alto-forno à carvão vegetal, que em diversas literaturas são classificadas como ácidas, atualmente com as especificações da NBR 5735 (ABNT, 1992), também podem ser classificadas como básicas.

Verificamos também que as escórias ácidas são classificadas como pozolanas artificiais. Esta definição tem suma importância neste estudo para definir qual o teor máximo de adição pode ser adicionado ao concreto dentro dos limites impostos pela fabricação de cimento.

A Tabela 2.6 apresenta os limites de adições para os cimentos compostos com adição de escória (CP II E) e materiais pozolânico (CP II Z), para o cimento Portland de alto-forno (CP III) e o cimento pozolânico (CP IV).

Tabela 2.6 Teores das adições de escória e pozolana de acordo com as normas brasileiras

Tipo	% de adição de escória	% de adição de material pozolânico
CP II E NBR 11578 (ABNT, 1991)	6-34	-
CP III NBR 5735 (ABNT 1991)	35-70	-
CP II Z NBR 11578 (ABNT 1991)	-	6-14
CP IV NBR 5736 (ABNT 1991)	-	15-50

A utilização de escória de alto-forno como adição mineral é prevista na NBR 12654 (ABNT, 1992), e as exigências para o produto são as mesmas estabelecidas para a fabricação de cimento. As normas internacionais e os estudos realizados para a utilização das escórias ou materiais pozolânicos no Brasil foram realizados com cimentos sem adições de escória alto-forno ou pozolana, normalmente os cimentos CP I, CII F ou CP V.

TANGO *et al.* (1994), cita que embora em outros países seja corrente o uso de escória em canteiros de obras, onde ela é adicionada ao concreto preparado com cimento Portland tradicional, no Brasil esta prática não é utilizada significativamente por razões diversas, incluindo a falta de dados técnicos e o desenvolvimento de dados a respeito e, apresenta uma proposta para a normalização do uso da escória como adição.

A escória para a utilização em concreto, assim como para adição ao cimento na fábrica, deve ser granulada para garantir a sua reatividade conforme descrito no item 2.3.2 e a escória deve ser moída a uma finura adequada. O cimento ou ativador deve atender as suas especificações, já consagradas e deve ser avaliada a compatibilidade com a escória em questão.

Concluiu-se que existem subsídios experimentais suficientes, tanto internacionais como nacionais, para estabelecer-se uma normalização brasileira para a prática do uso da escória, substituindo parcialmente o cimento Portland, no canteiro ou nas usinas de concreto (TANGO *et al.*, 1994).

As Tabelas 2.7 e 2.8 apresentam os requisitos químicos e físicos para as escórias de alto-forno pelas normas do Japão, Canadá, França, Estados Unidos, e Inglaterra.

Tabela 2.7 – Requisitos químicos para escórias de alto-forno por normas internacionais (TANGO *et al.*, 1994)

Descrição dos requisitos químicos	Limites especificados				
	JIS	CSA	AFNOR	ASTM	BS
Basidade = $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$	1,4 min	1,0 min	-	-	0,7 min
Sulfeto (S^{2-}), %	2,0 max	-	2,0 max	2,5 max	2,0 max
Trióxido de enxofre (SO_3), %	3,0 max	2,5 max	0,5 max	4,0 max	2,5 max
Óxido de magnésio (MgO), %	10,0 max	-	6,0 max	-	14,0 max
Umidade, %	1,0 max	-	-	-	1,0 max
Perda ao fogo, %	3,0 max	-	-	-	3,0 max
Resíduo insolúvel, %	-	-	-	-	1,5 max
Manganês (Mn_2O_3), %	-	-	-	-	2,0 max
Cloreto (Cl^-), %	-	-	-	C114	0,10 max
Adições minerais %	-	-	-	-	1,0
$\frac{\text{CaO}+\text{MgO}+1/3\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2+2/3\text{Al}_2\text{O}_3}$	-	1,0 min	-	-	-
$\frac{\text{CaO}+\text{CaS}+1/2\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2+\text{MnO}}$	-	1,5 min	-	-	-
SiO_2 , %	-	-	29 a 38	-	-
Al_2O_3 , %	-	-	13 a 24	-	-
CaO , %	-	-	38 a 48	-	-
FeO , %	-	-	4,0 max	-	-
MnO , %	-	-	2,0 max	-	-

Tabela 2.8 – Requisitos físicos para escórias de alto-forno por normas internacionais
(TANGO *et al.*, 1994)

Descrição dos requisitos físicos		Limites especificados				
		JIS	CSA	AFNOR	ASTM	BS
Massa específica (min.)		2,8	-	-	-	-
Área específica “Blaine” (cm ² /g) min		275			**	2750
Teor vidro (%) min		-	-	-	-	67,0
Resíduo na peneira nº 325 (0,045 mm) (via úmida) (%)		-	20,0	-	20,0	
Resistência à compressão (MPa) (min)	07 dias	-	-	-	-	12,0
	14 dias	-	3,5	-	-	-
	28 dias	-	10,5	-	-	32,5
Sanidade (mm) max		-	-	-	-	10,0
Índice da atividade da escória (min)	07 dias					
	classe 80	55	-	-	-	-
	classe 100	-	-	-	75	-
	classe 120	*	-	-	95	-
	28 dias					
	classe 80	75	-	-	75	-
	classe 100	-	-	-	95	-
	classe 120	*	-	-	115	-
	91 dias	95	-	-	-	-
Índice de consistência da argamassa, %, min		95	110	-	-	-
Teor de ar Incorporado da argamassa, %, max		-	-	-	12,0	-
Massa unitária, Kg/dm ³ , min.		-	-	0,8	-	-
Características originais	Cor	-	-	amarelo claro a escuro	-	-
	Textura	-	-	vítrea	-	-
	Superficial	-	-	rugosa	-	-

A necessidade de analisar as adições de escória de alto-forno em cimentos compostos deve-se ao fato que no ano de 2001 mais de 70% dos cimentos consumidos no Brasil foram cimentos compostos (SNIC, 2001).

Estudos realizados em concreto de alto desempenho por SOEDA (1999), com diversos tipos de adições, entre elas a escória, apresentaram resultados compatíveis de concretos com cimentos ordinários.

Segundo AITCIN (2000), a escória pode ser misturada ao cimento na fabricação ou ser vendida separadamente aos produtores de concreto, como material suplementar. Materiais misturados são mais comuns na Europa, enquanto que o uso da escória como um ingrediente à parte prevalece na América do Norte.

O uso das escórias de alto-forno como adição no Brasil tem sido amplamente discutida em virtude da revisão da NBR 12655 (ABNT, 1996). A comissão de estudo *CE 18.305.01- Controle de qualidade do concreto*, aprovou em sua 23ª reunião, a eliminação da escória como adição mineral no concreto com os seguintes argumentos:

- Nos outros países, os procedimentos sobre a incorporação de adições ao concreto têm o uso condicionado não apenas a qualidade da adição utilizada, mas especialmente ao uso de cimentos sem adições e aos equipamentos de mistura com centrais misturadoras. Enfatizou que a produção brasileira do cimento é espelhada na linha européia, com as adições realizadas na fabricação do cimento. As adições de sílica ativa e metacaulim devem ser mantidas;
- Deve-se verificar a compatibilidade das escórias com o clínquer;
- Os abusos praticados pela falta de controle no uso de adições têm ocasionado problemas de deformabilidade das estruturas de concreto (ABNT, 2005).

As discussões sobre o uso de escória de alto-forno como adição no concreto geraram, em 2005, discussões nos órgãos de defesa do consumidor. A Secretaria de Direito Econômico (SDE), está nos estágios finais do processo instaurado contra as cimenteiras no fim de 2003, que acusava as dez maiores indústrias de formar um cartel do cimento. As fábricas haviam decidido vender as concreteiras somente o cimento CP III. As concreteiras utilizavam o cimento CP II com menor quantidade de adição para realizar a adição de outros insumos, principalmente a escória de alto-forno. Desta forma as concreteiras reduziam os seus custos (O Estado de São Paulo, 2005b).

Conforme apresentado, existem profundas divergências tanto técnicas quanto comerciais para a utilização da escoria de alto-forno como adição.

Tecnicamente algumas questões poderiam ser analisadas com as seguintes considerações:

- Pode-se adotar o método da dissolução seletiva por EDTA para determinar a quantidade de escória para que as adições respeitem os limites máximos estabelecidos pelas normas de cimento. Este método adotado por laboratórios de competência comprovada poderia estabelecer o texto normativo para o ensaio.
- A informação, por parte das indústrias de cimento, da quantidade adicionada durante a fabricação. Esta prática já vem sendo adotada por algumas cimenteiras.
- Para o questionamento da eficiência dos caminhões betoneiras para realizar a mistura do concreto com adições minerais poderia ser aplicado as recomendações do anteprojeto de norma *Mercosul 05:03-0903: Uniformidade do concreto da betonada*. Neste anteprojeto devem ser comparadas duas amostras separadas, que representam o concreto da betonada ensaiada. O concreto de uma betonada deve ser considerado

uniforme quando os resultados dos ensaios obtidos sobre amostras comparativas satisfaçam ao primeiro e, ao menos, a mais quatro dos requisitos na Tabela 2.9. Para cada requisito fixado deve ser estabelecida a variação dentro de uma mesma betonada de concreto, como sendo a diferença entre o maior e o menor valor, obtidos de duas amostras diferentes dessa betonada (CMN, 1998 a).

Independente da atual situação a qual se encontra a normalização do uso da adição mineral no concreto, as possibilidades de avanço do mercado são significativas aliadas à questão ambiental.

Deve-se buscar o atendimento às necessidades específicas dos clientes denominadas de customization⁽¹⁴⁾. A criação de mercados alternativos ao oligopsônio⁽¹⁵⁾ cimenteiro é a única forma que as siderúrgicas possuem para agregar valor ao seu produto (JOHN, VANDERLEY M.,1995).

Tabela 2.9 - Diferenças máximas admissíveis para avaliar a uniformidade do concreto de uma betonada (CMN, 1998 a)

Ensaio	Unidade	Diferença máxima admissível
Resistência à compressão ⁽³⁾	MPa %	3,0 a 7,5 ⁽⁴⁾
Massa específica do concreto fresco	Kg/m ³	16
Teor de ar, volume	%	1,0
Teor de agregado graúdo ⁽¹⁾	%	6,0
Abatimento médio	mm	De acordo com o PNM 05:03-0900 (CMN, 1998 b)
Massa específica da argamassa ⁽²⁾	%	1,6
⁽¹⁾ Material retido na peneira 4,75mm.		
⁽²⁾ Valores médios, descontado o ar incorporado.		
⁽³⁾ Médias à idade de 7d, referidas a pelo menos três corpos-de-prova cilíndricos.		
⁽⁴⁾ Deve ser adotado o menor dos limites estabelecidos, com relação à média.		

⁽¹⁴⁾ O termo vem do inglês customer, que significa cliente.

⁽¹⁵⁾ Segundo o AURÉLIO é uma estrutura de mercado onde há apenas reduzido número de compradores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais empregados na composição do concreto e os métodos de ensaios utilizados no estudo experimental.

3.1 Cimento

O cimento utilizado na elaboração dos traços de concreto foi o cimento CP V ARI RS⁽¹⁶⁾. Este cimento foi escolhido em função da facilidade de aquisição pelas concreteiras, de sua elevada resistência à compressão nas primeiras idades (1 e 3 dias) e da adição de escória de alto-forno na sua fabricação. Este cimento atende todas as exigências estabelecidas na NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992).

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização química e físico-mecânica, segundo as normas brasileiras para o cimento adotado para a realização dos ensaios experimentais deste estudo.

⁽¹⁶⁾ Cimento Portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos.

Tabela 3.1 - Composição química do cimento CP V ARI RS

Ensaio		Normas	Resultados (% em massa)
Perda ao fogo	PF	NBR 5743/89	0,85
Dióxido de silício total	SiO ₂	NBR 9203/85	26,09
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	NBR 9203/85	9,30
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	NBR 9203/85	2,04
Óxido de cálcio total	CaO	NBR 9203/85	54,91
Óxido de magnésio	MgO	NBR 9203/85	3,16
Anidrido sulfúrico	SO ₃	NBR 5745/89	2,53
Óxido de sódio	Na ₂ O	NBR 5747/89	0,10
Óxido de potássio	K ₂ O	NBR 5747/89	0,50
Enxofre	S	NBR 5746/91	0,28
Anidrido carbônico	CO ₂	NBR 11583/91	0,85
Resíduo insolúvel	RI	NBR 5744/89	0,87
Óxido de cálcio livre	CaOI	NBR 7227/89	0,70
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 X K ₂ O + Na ₂ O%)			0,429

Tabela 3.2 - Caracterização físico-mecânica do cimento CP V ARI RS

Ensaio	Normas	Resultados
Finura resíduo na peneira de 75 μm (%)	NBR 11579/91	1,8
Massa específica (g/cm^3)	NBR NM 23/01	3,01
Área específica (cm^2/g)	NBR NM 76/98	4540
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR 11580/91	28,1
Início de pega (h:min)	NBR 11581/91	2:15
Fim de pega (h:min)	NBR 11581/91	2:55
Expansibilidade de L \hat{e} Chatelier à quente	NBR 11582/91	0,5

Resistência à compressão (MPa) – (NBR 7215/96)						
Idade (dias)	Corpo-de-prova nº				Média	DRM (%)
	1	2	3	4		
1	11,7	11,7	11,9	11,4	11,7	2,6
3	25,8	25,3	26,9	26,2	26,1	3,1
7	38,7	36,3	36,7	36,3	37,0	4,6
28	53,0	52,0	53,5	51,5	52,5	1,9

O teor de escória existente no cimento foi determinado pelo método de dissolução seletiva EDTA da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland POGT – 5006 (ABCP, 2004), apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 -Teor de escória do cimento CP V ARI RS

Cimento	Teor de escória (%)
CP V ARI RS	29

3.1.1 Escória de alto-forno

Neste estudo experimental foram utilizados dois tipos de escória de alto-forno:

a) escória de alto-forno à carvão vegetal;

A escória de alto-forno à carvão vegetal utilizada é proveniente da região oeste do Estado de Minas Gerais, de uma usina independente de ferro-gusa (Merchant Pig Iron).

A amostra da escória de alto-forno à carvão vegetal foi coletada aleatoriamente no pátio de estocagem da siderúrgica, sob a forma granulada, com idade inferior a um mês conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2001).

Em seguida, foi moída em moinho de bolas intermitente, com capacidade de 20 litros, por uma hora, sendo utilizado neste estudo apenas o material passante na peneira #100.

b) escória de alto-forno à coque

O segundo tipo de escória, a escória de alto-forno à coque, é proveniente da siderúrgica Usiminas. Esta escória foi fornecida por uma empresa de moagem instalada na região, sob a forma moída.

A determinação do grau de vitrificação e do índice de refração de escória de alto-forno por microscopia de luz transmitida é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Grau de vitrificação e índice de refração da escória de alto-forno

Escória	Grau de vitrificação (%)	Índice de refração (n)
Carvão vegetal	97,6	1,62
Coque	94,3	1,64

A caracterização da escória de alto-forno, apresentada na Tabela 3.5, foi feita através dos ensaios de análise química de escória por complexometria e a difratometria por raios-X na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 Composição química da escória de alto-forno

Ensaio		Normas	Resultados (% em massa)	
			Carvão vegetal	Coque
Perda ao fogo	PF	NBR 5743/89	0,25	0,57
Dióxido de silício total	SiO ₂	NBR 9203/85	45,2	35,5
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	NBR 9203/85	15,5	12,07
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	NBR 9203/85	2,23	1,24
Óxido de cálcio total	CaO	NBR 9203/85	32,7	39,49
Óxido de magnésio	MgO	NBR 9203/85	1,41	8,38
Anidrido sulfúrico	SO ₃	NBR 5745/89	0,46	1,04
Óxido de sódio	Na ₂ O	NBR 5747/89	0,06	0,16
Óxido de potássio	K ₂ O	NBR 5747/89	1,22	0,34
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 X K ₂ O + Na ₂ O%)			0,86	0,38

Tabela 3.6. Minerais da escória de alto-forno pela difratometria de raio – X

Minerais	Quimismo aproximado	Distância interplanar principal (Å)	Frequência relativa	
			Carvão vegetal	Coque
Quartzo	SiO ₂	3,34	*	*
Caulinita ⁽¹⁷⁾	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7,21	tr	tr
Feldspato	(K ₁ Na[AlSi ₃ O ₈]- CaAl ₂ Si ₂ O ₈	2,18	nd	tr
Pseudowollastonita	CaSiO ₃	3,23	nd	nd
Wollastonita	CaSiO ₃	2,99	nd	nd
Ferro metálico	α - Fé	2,02	tr	nd
Magnetita	Fe ₃ O ₄	2,51	tr	nd
Hematita	Fe ₃ O ₃	2,69	nd	tr
Calcita	CaCO ₃	3,03	nd	tr

A avaliação semiquantitativa (expressa em número de asteriscos) das fases esta fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade do constituinte.

nd : não detectado

tr : traços

***** : presente

****** : pouco freqüente

******* : freqüente

******** : muito freqüente

A difratometria de raios-X é apresentada na Tabela 3.6 é mostrada pelas Figuras 3.1 e 3.2.

⁽¹⁷⁾ A presença de caulinita sob forma de traços pode estar relacionada à contaminação da amostra.

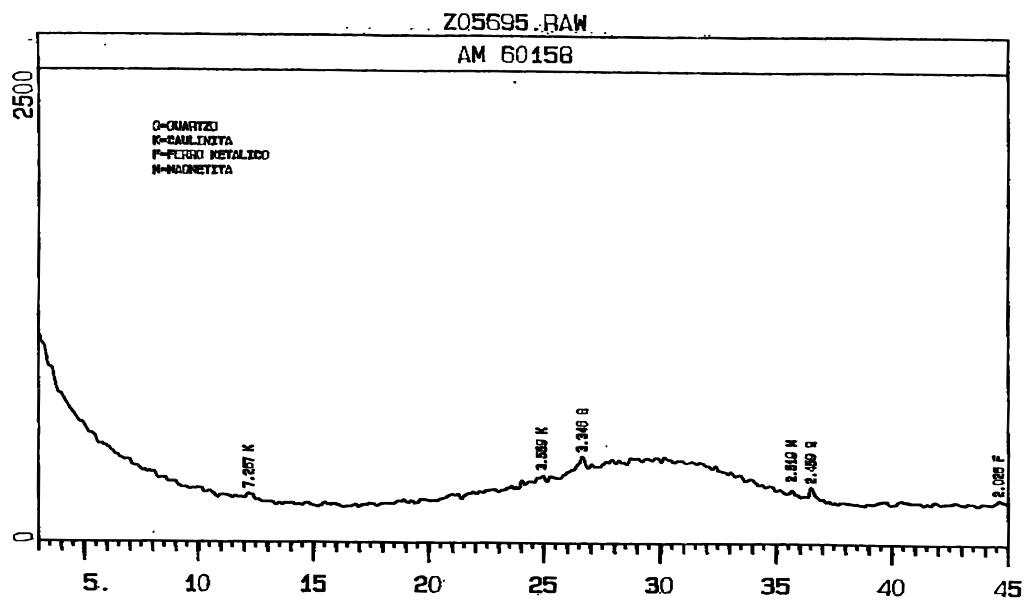


Figura 3.1 Difratoograma da escória de alto-forno à carvão vegetal

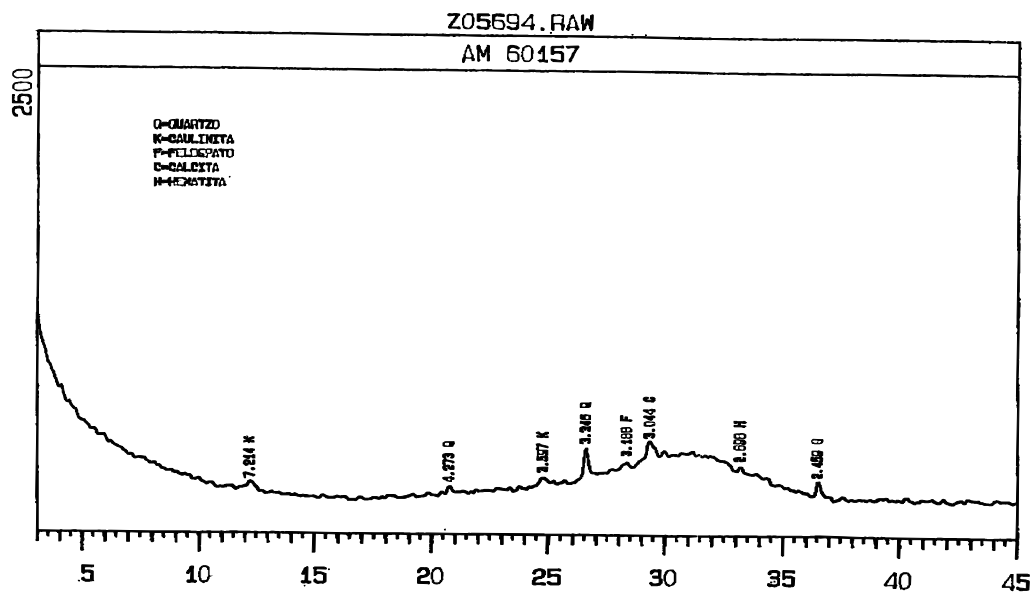


Figura 3.2 Difratoograma da escória de alto-forno à coque

A determinação do *índice de atividade pozolânica* com cimento Portland foi realizada conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992). Este índice é determinado pela relação entre a resistência média à compressão de corpos-de-prova, moldado com cimento e material pozolânico, pela resistência média à compressão dos corpos-de-prova moldado com cimento. Uma parte do cimento (aproximadamente 35%) é substituída pelo material pozolânico (sendo consideradas as massas específicas de ambos).

A caracterização física da escória de alto-forno à carvão vegetal e coque com o índice de atividade pozolânica com cimento, a determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) e a determinação de massa específica estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Caracterização física da escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque

Escória	Área específica (cm²/g)	Massa específica (g/cm³)	Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (%)	Água requerida (%)
Carvão vegetal	3850	2,88	86,3	98,5
Coque	3800	2,87	105,0	99,4

A análise granulométrica da escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque na forma granulada está na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Análise granulométrica da escória de alto-forno

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa.				
Escória	Carvão vegetal		Coque	
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Individual	Acumulada
6,3	0	0	0	0
4,8	13	13	0	0
2,4	19	32	1	1
1,2	30	62	15	16
0,6	21	83	49	65
0,3	8	91	27	92
0,15	3	94	6	98
Fundo	6	100	2	100
Total	100	375	100	272

As escórias apresentam diferenças visuais na forma granulada devido o método de granulação utilizado, como apresentado na Figura 3.3.

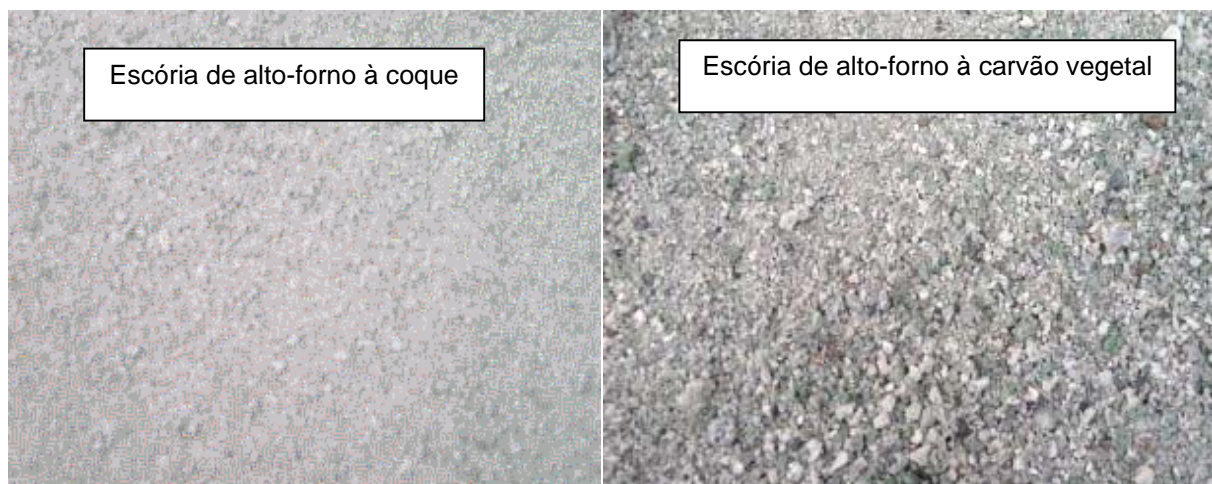


Figura 3.3. Aspecto da escória de alto-forno granulada

Após a moagem, o seu aspecto é semelhante ao cimento. Na Figura 3.4 observa-se tal comportamento.



Figura 3.4. Aspecto da escória de alto-forno moída e do cimento Portland

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados na pesquisa, Tabela 3.9, foram submetidos aos ensaios de caracterização física, previstos na NBR 7211 (ABNT, 1983).

Tabela 3.9 - Caracterização física dos agregados miúdos e graúdos

Composição granulométrica – porcentagem retida, em massa.						
Agregado	Areia		Pedrisco		Brita1	
Peneira ABNT Abertura nominal (mm)	Individual	Acumulada	Individual	Acumulada	Individual	Acumulada
19	0	0	0	0	2	2
12,5	0	0	0	0	57	59
9,5	0	0	0	0	30	89
6,3	0	0	15	15	10	99
4,8	0	0	7	22	0	99
2,4	1	1	29	51	0	99
1,2	2	3	21	72	0	99
0,6	4	7	12	84	0	99
0,3	25	32	6	90	0	99
0,15	59	91	7	97	0	99
Fundo	9	100	3	100	1	100
Total	100	134	100	416	100	685
Agregado				Areia	Pedrisco	Brita 1
Dimensão máxima característica (mm)				1,2	9,5	19
Módulo de finura				1,34	4,16	6,85
Teor de material pulverulento (%)				0,5	6,6	0,6
Teor de argila em torrões (%)				0	-	-
Massa específica (g/cm ³)				2,64	2,73	3,02
Massa unitária				1530	1590	1570
Impureza orgânica				<300	-	-

3.1.3 Aditivos

O aditivo polifuncional utilizado foi caracterizado quanto ao teor de sólidos, peso específico e pH, e estes valores estão demonstrados na Tabela 3.10. Este aditivo é um polifuncional utilizado normalmente pelas concreteiras.

Tabela 3.10. Teor de sólidos e pH do aditivo

Teor de sólidos (%)	Peso específico (g/cm ³)	pH
43	1,21	8,2

3.1.4 Água

A água utilizada foi proveniente de rede publica da cidade de Campinas, em conformidade com a norma IRAM 1601 (IRAM, 1986) cujo resultado encontra-se na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Análise química da água

Água	Cloretos (mg/l)	Matéria orgânica (mg/l)	Açúcar (mg/l)	Sulfatos (mg/l)	Teor de sólidos (%)	pH
Rede pública	7,70	0	ausente	2,88	131,20	7,36

3.2 Metodologia

Nesta seção encontra-se descritos os métodos experimentais empregados neste estudo. Os ensaios seguem as Normas Brasileiras da ABNT, (NBR) e as Normas Mercosul (NBR NM).

Para a realização dos ensaios propostos foram utilizados corpos-de-prova de concreto preparados com cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos, escória de alto-forno à carvão vegetal/coque, areia, pedrisco, brita 1, água e aditivo polifuncional.

A proporção destes materiais foi obtida junto a uma concreteira situada na cidade Campinas. As exigências de durabilidade estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2003) foram atendidas de acordo com as classes de agressividade ambiental I, II e III, apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Correspondência entre classe de agressividade e qualidade especificadas pela NBR 6118:2003 com os traços unitários⁽¹⁸⁾ em massa dos concretos estudados

Concreto	Classe de agressividade ambiental		
	I	II	III
Relação água/cimento em massa	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$
Classe de concreto NBR 8953 (ABNT, 1992)	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$
Traço de concreto unitário em massa	1: 2,20: 1,87: 3,42: 0,65	1: 1,98: 1,68: 3,16: 0,60	1: 1,76: 1,51: 2,92: 0,55

⁽¹⁸⁾ Traço unitário: 1:a:b₁:b₂:x – cimento:areia:pedrisco:brita:água.

Os traços de concreto em função dos teores de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e coque são mostrados na Tabela 3.13, considerando que o cimento utilizado na pesquisa possui em sua composição 29% de adição de escória, conforme demonstrado na Tabela 3.3. Para obter-se os teores de 35% e 70%, foram adicionados mais 8% e 57% respectivamente das escórias de alto-forno no concreto.

Tabela 3.13. Teores de adição de escória de alto-forno para os traços de concreto

Concreto	Relação água/aglomerante	Adição de escória a carvão vegetal	Adição de escória a carvão coque	Total de escória adicionada
A 1 (Classe I)	0,65	0%	0%	X%
A 2 (Classe II)	0,60	0%	0%	X %
A 3 (Classe III)	0,55	0%	0%	X%
B 1 (Classe I)	0,65	35% - X%	-	35%
B 2 (Classe II)	0,60	35% - X%	-	35%
B 3 (Classe III)	0,55	35% - X%	-	35%
B 4 (Classe I)	0,65	70% - X%	-	70%
B 5 (Classe II)	0,60	70% - X%	-	70%
B 6 (Classe III)	0,55	70 % - X%	-	70%
C 1 (Classe I)	0,65	-	35% - X%	35%
C 2 (Classe II)	0,60	-	35% - X%	35%
C 3 (Classe III)	0,55	-	35% - X%	35%
C 4 (Classe I)	0,65	-	70% - X%	70%
C 5 (Classe II)	0,60	-	70% - X%	70%
C 6 (Classe III)	0,55	-	70% - X%	70%

X % - Teor de escória adicionada ao cimento pelo fabricante

Para 35% - X% → X% = 8%

Para 70% - X% → X% = 57%

Neste estudo foram considerados como variáveis fixas independentes o cimento CP V ARI RS, as escórias de alto-forno à carvão vegetal e coque, os agregados miúdos e grãos, o aditivo polifuncional e a quantidade, o teor de argamassa em massa (arg%)⁽¹⁹⁾ e a quantidade de água de 175 l/m³.

⁽¹⁹⁾ Teor de argamassa em massa (arg%): $\text{arg\%} = (1+a)/(1+m)$, onde a = areia e m = areia(a) + brita(b), obtido no traço unitário.

A caracterização mecânica do concreto endurecido foi realizada pelos ensaios de resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias, resistência a tração na flexão e módulo de elasticidade aos 28 dias.

No concreto fresco foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento (slump-test) e teor de ar incorporado (pressométrico) em todos os traços propostos. Nos traços A1, A2, A3, B4, B5, B6, C4, C5 e C6 também foram determinados o tempo de pega e exsudação (traços sem adição de escória e com o teor máximo de 70% com a adição de escória de alto-forno a carvão vegetal e coque).

3.2.1 Método de dissolução seletiva para determinação do teor de escória em cimento

A determinação do teor de escória pelo método de dissolução seletiva está baseado em diretrizes gerais da publicação: Demoulian, E.; Vernet, C.; Hawthorn, F.; Gourdin, P. Détermination de la teneur en laitier dans les ciments par dissolutions sélectives” - 7o Congrès International de la Chimie des Ciments. Vol II. pp III-151/156. Editions Septima: Paris, 1980.

O método descreve o procedimento de ensaio quantitativo para determinação do teor de escória granulada de alto-forno por dissolução seletiva em cimento Portland anidro ou hidratado.

O método consiste no tratamento de uma pequena porção de amostra de cimento com solução de EDTA e trietanolamina, mantendo-se sob agitação por 30min. em temperatura e pH controlados. Após o ataque o material é filtrado, lavado e o resíduo é seco em estufa a 100°C, esfriado e pesado.

Com base na *referência bibliográfica* citada o material que se dissolve no ensaio com EDTA é clínquer e o que permanece insolúvel é escória de alto forno.

3.2.2 Atividade pozolânica das escórias

Uma das principais propriedades físicas das escórias de alto-forno para ser utilizada como adição ao concreto é o *índice de atividade pozolânica*. Este índice pode ser determinado tanto com cimento Portland como com cal. A NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece que o material pozolânico com ações aglomerantes deve apresentar valores de *índice de atividade pozolânica* com cimento aos 28 dias valores superiores a 75%. Quanto maior o valor apresentado, maior será a substituição da adição por cimento em concretos para se obter a mesma resistência.

As adições estudadas foram analisadas conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992). O método consiste na moldagem de copos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro x 100 mm de altura), com o método de cura e ruptura conforme estabelecido na NBR 7215 (ABNT, 1996), de dois traços de argamassas "A" e "B". A argamassa "A" é preparada somente com cimento Portland e a argamassa "B" com a substituição de 35% do volume absoluto de cimento por material pozolânico. As argamassas devem apresentar o mesmo *índice de consistência* (225 mm \pm 5 mm) conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996).

O *índice de atividade pozolânica* é a relação entre a resistência média da argamassa "B" pela resistência média da argamassa "A" aos 28 dias. Também deve ser determinada a água requerida, que é uma relação entre a água requerida da argamassa "B" pela água requerida da argamassa "A" para a obtenção do *índice de consistência normal da argamassa*.

3.2.3 Preparação de concreto em laboratório

As diferentes práticas adotadas para preparação de concreto em laboratório influenciam nos resultados dos ensaios de concreto fresco e endurecido. Neste estudo, a preparação dos traços foi realizada conforme a NBR 12821 (ABNT, 1993) e a amostragem do concreto conforme a NBR NM 33 (ABNT, 1998).

Os agregados foram preparados na condição de saturado com superfície úmida, com correção da umidade conforme a NBR 9775 (ABNT, 1987). O aditivo polifuncional foi adicionado na mistura do concreto após a adição da água.

3.2.4 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão é, provavelmente, a mais importante propriedade do concreto endurecido. Diversas outras propriedades do concreto estão relacionadas com a resistência à compressão.

Neste estudo, a resistência à compressão axial foi analisada nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), e utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro com 300 mm de altura, moldados 02 (dois) corpos-de-prova manualmente para cada idade, capeados com uma mistura de enxofre e quartzo moído (3:1) e curados em câmara úmida conforme estabelecido na NBR 5738 (ABNT, 2003).

3.2.5 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão é uma propriedade muito solicitada para projetos de pavimentos de concreto. O método para a verificação da resistência à tração na flexão consiste na moldagem de corpos-de-prova prismáticos de seção transversal quadrada (150 mm de largura x 150 mm de altura x 500 mm de comprimento), mantidos submersos em água até o momento do ensaio.

O carregamento é realizado com a aplicação de duas cargas no terço médio do vão de carregamento conforme a NBR 12142 (ABNT, 1991). Pode-se correlacionar a resistência à compressão axial com a resistência à tração na flexão devido a maior facilidade e rapidez na realização do ensaio à compressão.

3.2.6 Módulo de elasticidade

A rigor, o módulo de elasticidade está relacionado com o valor médio da resistência do concreto (f_{cm}). Como o f_{cm} não é conhecido na fase de projeto, o módulo é calculado em função da resistência característica do concreto (f_{ck}) definido aos 28 dias. A NBR 6118 (ABNT, 2003), especifica dois módulos de elasticidade a serem determinados: o módulo de elasticidade secante e o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial.

Neste estudo foi analisado o módulo de elasticidade (E_{ci}).

Para a realização dos ensaios foram moldados cinco corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e ensaiados, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2003), para cada traço de concreto proposto.

Dois corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial para a determinação do valor médio da resistência à compressão. Os outros três corpos-de-prova foram submetidos a um carregamento até aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto para a determinação a deformação, instrumentados com aparelhos para medição.⁽²⁰⁾ Depois de efetuadas toda a leitura das deformações, aumenta-se a carga até a ruptura.

3.2.7 Consistência do concreto pelo abatimento

A consistência do concreto é um parâmetro da sua trabalhabilidade. Usualmente, a trabalhabilidade dos concretos plásticos é medida pelo abatimento do tronco de cone, devido à facilidade da aplicação do método para controlar a uniformidade da produção de concreto. Ressalta-se aqui que a qualidade e quantidade dos aglomerantes alteram esta medida.

Este método consiste no enchimento de um molde tronco-cônico com concreto e, em seguida, o molde é vagarosamente suspenso. Em decorrência do peso próprio, o concreto é abatido na ausência do molde e a diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto. A descrição detalhada deste método esta na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

⁽²⁰⁾ Nesta pesquisa, foi utilizado aparelho mecânico com bases de medidas independentes para a determinação do módulo de elasticidade (E_{ci}) aos 28 dias.

3.2.8 Teor de ar incorporado

A determinação do teor de ar incorporado está relacionada com a manutenção da qualidade e uniformidade da mistura do concreto.

A alteração dos tipos de aglomerantes na pesquisa possibilitou a avaliação do comportamento desta propriedade nos traços de concreto propostos. Foi utilizado o método pressométrico conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002).

Este método utiliza o medidor com uma campânula de medida e um sistema de vedação. O princípio do método consiste no preenchimento de todo volume da campânula com água sobre o volume conhecido de concreto. Aplica-se uma pressão de ar pré-estabelecida sobre a água que penetra no concreto, reduzindo o volume de ar na amostra.

Esta quantidade é calibrada em termos de porcentagem de vazios na amostra de concreto, registrada no manômetro do equipamento.

3.2.9 Tempo de pega

As reações do cimento com a água se relacionam basicamente com o tempo de pega do concreto. Entretanto, o tempo de pega do concreto não coincide com o tempo de pega do cimento utilizado no concreto, devido a diferença da relação água/aglomerante adotada nos ensaios, método de ensaio, condições ambientais e outros.

A pega do concreto é definida como a solidificação de uma mistura fresca de concreto, tendo os tempos de início e fim definidos arbitrariamente por métodos de ensaios, entre eles o de penetração adotado neste estudo.

A determinação do tempo de início e fim de pega pelo método de penetração apresenta pontos de referência, onde o início de pega é o limite do manuseio e o fim de pega é o início do desenvolvimento da resistência mecânica. Esta propriedade sofre forte influência dos componentes do cimento, da relação água/aglomerante e da temperatura ambiente que apresenta diferenças entre as condições na obra com as condições do laboratório.

O método da norma NBR NM 9 (ABNT, 2003) consiste em remover a argamassa do concreto por peneiramento e compactá-la em um recipiente padrão. Com o aparelho denominado penetrômetro de Proctor mede-se a força necessária para penetrar 25 mm de uma agulha na argamassa até obter a resistência de 3,5 MPa e 27,6 MPa, início e fim de pega respectivamente. Este método pode ser aplicado nas condições ambientais do local de aplicação.

Foram analisados os tempos de início e fim de pega para os traços sem adição complementar de escória (referência) e para os traços com o limite máximo de 70% previsto na NBR 5735 (ABNT, 1991) de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e coque.

3.2.10 Exsudação

METHA e MONTEIRO (1994), definem exsudação como um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície do concreto após o lançamento e adensamento, porém antes do início de pega. Como a água é o componente mais leve do concreto, a exsudação é uma forma de segregação.

Dentre as preocupações no controle desta propriedade, está a tendência a pulverulência nas superfícies de lajes e pavimentos. Com a percolação da água pelos capilares internos do concreto, partículas mais finas como cimento e areia são carregadas para a superfície. Como esta camada contém alta relação água/aglomerante, a camada superficial torna-se porosa, fraca e com tendência ao craqueamento.

O aumento do consumo de cimento e o uso de adições minerais como as escórias de alto-forno são medidas adotadas para combater a tendência de exsudação (METHA e MONTEIRO, 1994).

O método para determinação da exsudação segundo a NM 102 (CMN, 1996), método B, consiste na colocação de uma amostra de concreto em um recipiente padronizado. A água exsudada acumulada na superfície é retirada em intervalos de tempo pré-estabelecido. A exsudação é a quantidade de água acumulada na superfície em relação à quantidade de água existente na amostra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de hidráulidade das escórias, os resultados dos ensaios do concreto fresco e endurecido dos traços de concreto estudados, juntamente com a discussão dos resultados obtidos. Também apresentamos a análise econômica da utilização da escória à carvão vegetal como adição.

4.1 Hidráulidade das escórias

A NBR 12654 (ABNT, 1992), considera como adições minerais de natureza hidráulica latente as escorias básicas de alto-forno que atendem a NBR 5735 (ABNT, 1991), sendo que esta norma estabelece que a composição química da escória granulada de alto-forno deve obedecer à relação:

$$(CaO + MgO + Al_2O_3) / SiO_2 > 1^{(21)}$$

⁽²¹⁾ CaO: óxido de cálcio, MgO: óxido de magnésio, Al₂O₃: óxido de alumínio, SiO₂: óxido de silício.

SOARES (1982), denomina a relação entre a soma dos teores de óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de alumínio com o óxido de silício como sendo *índice de hidraulicidade*. Se a relação for maior ou igual a um (≥ 1) a escória possui atividade hidráulica para ser utilizada na produção do cimento Portland de alto-forno e se for menor que um (< 1) as características de pozolanicidade devem ser determinadas de modo que sejam permitidas ou não a sua utilização para a produção do cimento Portland pozolânico.

As escórias estudadas atendem as especificações da NBR 5735 (ABNT, 1991), pois apresentam valores do *índice de hidraulicidade* de 1,16 para a escória de alto-forno à carvão vegetal e 1,68 para a escória de alto-forno à coque, o que permite a sua utilização como adição mineral em concreto.

Outro índice que foi avaliado foi o *índice de basicidade*. Este índice é a relação entre a porcentagem de óxido de cálcio e óxido de silício (CaO/SiO_2).

A escória pode ser considerada ácida quando esta relação for menor que um (< 1) e essencialmente básica quando for igual ou maior que um (≥ 1). Pode-se considerar que um elevado teor de óxido de alumínio (Al_2O_3) pode neutralizar a acidez, tornando a escória com características básicas (SOARES, 1992).

Pela avaliação do *índice de basicidade*, as escórias estudadas foram consideradas como ácida, a escória de alto-forno à carvão vegetal com índice de 0,72 e básica a escória de alto-forno à coque com índice de 1,11 (SOARES, 1992).

Métodos de previsão de hidraulicidade com base na composição química confirmam as considerações de BATAGIN e ESPER (1988), de que as escórias de alto-forno à carvão vegetal que atendam o *índice de hidraulicidade* maior que um (> 1), porém com *índice de basicidade* menor ou igual a um (≤ 1), apresentam resultados nos ensaios de resistência à compressão satisfatória, estando aptas à utilização na indústria cimenteira.

Vale ressaltar que a utilização de escórias granuladas de alto-forno como adição mineral no concreto deve atender a norma NBR 5735 (ABNT, 1991), que fixa as condições exigidas no recebimento de cimento Portland de alto-forno.

Foi considerado neste estudo que a escória de alto-forno à carvão vegetal pode ser utilizada como uma escória e não como uma pozolana, devido a neutralização da acidez pelo óxido de alumínio, tornando a escória com características básicas.

A atividade pozolânica da escória de alto-forno à coque foi 21% superior a escória de alto-forno à carvão vegetal conforme demonstrado na Tabela 3.7, do capítulo 3 que trata dos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

4.2 Resistência à compressão

O comportamento da resistência à compressão do concreto foi analisado nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias. As relações água/aglomerantes utilizadas foram 0,65, 0,60 e 0,55 e foi tomado como referência o concreto sem adição de escória.

Ressalta-se aqui que os valores das resistências à compressão obtidas para as três relações água/aglomerante apresentaram o comportamento estabelecido pela lei de Abrams.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, conforme esperado para um concreto moldado em iguais condições de mistura, cura e ensaio, apresentaram menor resistência à compressão com o aumento da relação água/aglomerante (NEVILLE, 1982).

Verificou-se que a resistência relativa média à compressão (f_{cj}/f_{c28}) para todas as idades, independentes do tipo de escória, da quantidade da adição utilizada e da relação a/c, apresentou pequena variação conforme demonstrado na Tabela 4.1.

Exemplificando: a resistência relativa a um dia é a resistência à compressão na idade de um dia dividido pela resistência à compressão na idade de 28 dias.

Tabela 4.1 - Resistência relativa média à compressão para diversas idades e adições

Dosagem do concreto	Resistência relativa média à compressão				
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	60 dias
Concreto sem adição	0,14+-0,00	0,52+- 0,00	0,69+- 0,00	1,00	1,08+- 0,01
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal (Adição total de 35%)	0,12+- 0,00	0,51+- 0,01	0,68+- 0,01	1,00	1,13+- 0,00
Concreto com adição de 8% de escória à coque (Adição total de 35%)	0,13+- 0,00	0,50+- 0,01	0,66+- 0,01	1,00	1,12 +- 0,01
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal (Adição total de 70%)	0,01+- 0,01	0,45+- 0,03	0,65+-0,04	1,00	1,14+-0,03
Concreto com adição de 57% de escória à coque (Adição total de 70%)	0,05+- 0,00	0,41+-0,02	0,62+-0,01	1,00	1,10+- 0,00

Analisando os resultados de resistência à compressão obtidos, foi verificado que em comparação ao concreto sem adição de escória, apenas os traços com adição de escória de alto-forno à coque apresentaram resistência à compressão maiores que o concreto sem adição nas idades acima do 28º dia, esses resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Redução/aumento médio da resistência do concreto em relação ao concreto referência

Dosagem do concreto	Redução/aumento médio da resistência à compressão				
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	60 dias
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal (Adição total de 35%)	-19 %	-9%	-8%	-6%	-2%
Concreto com adição de 8% de escória à coque (Adição total de 35%)	-11%	-5%	-4%	0%	3%
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal (Adição total de 70%)	-93%	-27%	-20%	-15%	-11%
Concreto com adição de 57% de escória à coque (Adição total de 70%)	-67%	-19%	-7%	3%	5%

O sinal negativa significa redução

A Figura 4.1 apresenta o efeito da relação água/aglomerante na resistência do concreto pela curva de Abrams⁽²²⁾ para os traços de concreto sem adição de escória.

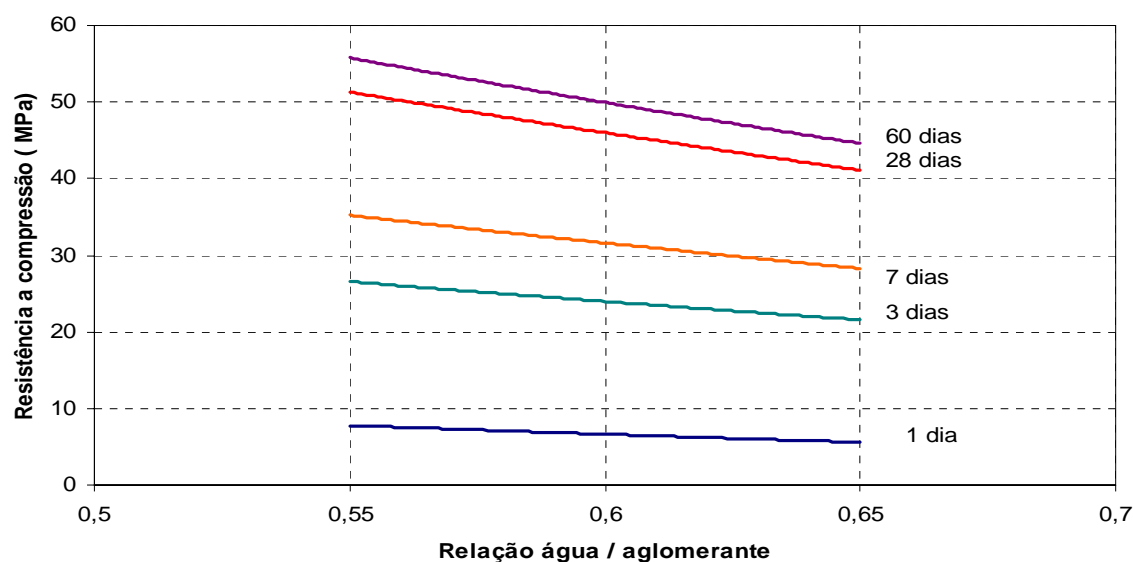


Figura 4.1 - Curvas de Abrams do concreto sem adição de escória

⁽²²⁾ Em 1918, como resultado de um extenso programa de ensaios no Institute Lewis, Universidade de Illinois, Duff Abrams determinou que existia uma relação entre a relação água/cimento e a resistência do concreto. Popularmente conhecida como lei de Abrams da relação água/cimento, esta relação inversa é representada pela expressão: $f_c = k_1/k_2^{a/c}$ onde a/c representa a relação água/cimento da mistura do concreto e k_1 e k_2 são constantes empíricas. (META E MONTEIRO 1994).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial encontram-se no Anexo B. A amplitude máxima (maior valor menos o menor valor) encontrada nos ensaios de compressão axial foi de 1,8 MPa

Os modelos de regressão obtidos para resistência à compressão axial pela relação a/c em todas as idades estão apresentados no Anexo C, onde o menor coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 97,53%.

Os modelos de regressão obtidos para a resistência à compressão axial pela idade de ensaio estão apresentados no Anexo D, onde o menor coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 97,11%.

Estes resultados foram obtidos com auxílio do programa Microsoft Excell 2000.

4.2.1 Resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à carvão vegetal

A resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória a carvão vegetal apresentou queda em todas as idades analisadas em comparação ao concreto referência. As quedas apresentadas foram de 19%, 9%, 8%, 6% e 2% respectivamente nas idades de 1, 3, 7, 28 e 60 dias.

A Figura 4.2 apresenta o efeito da relação água/aglomerante na resistência do concreto pela curva de Abrams para os traços de concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à carvão vegetal.

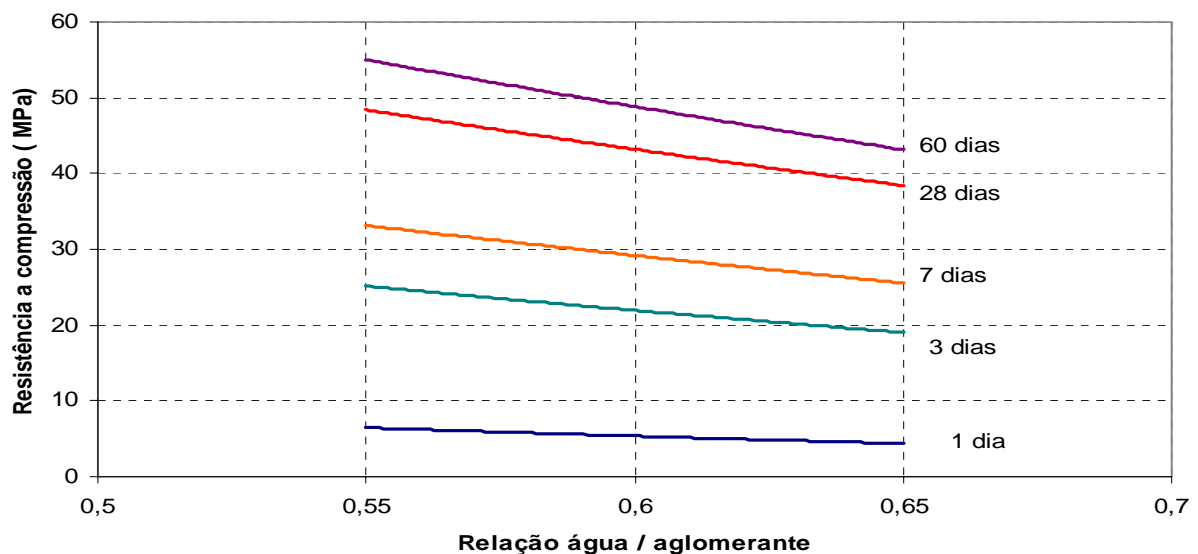


Figura 4.2 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à carvão vegetal

4.2.2 Resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque

A resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque apresentou queda de 11%, 5% e 4% nas idades de 1, 3 e 7 dias respectivamente. No 28º dia o concreto apresentou a mesma resistência e aumentou em 3% aos 60 dias.

A Figura 4.3 apresenta o efeito da relação água/aglomerante na resistência do concreto pela curva de Abrams para os traços de concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque.

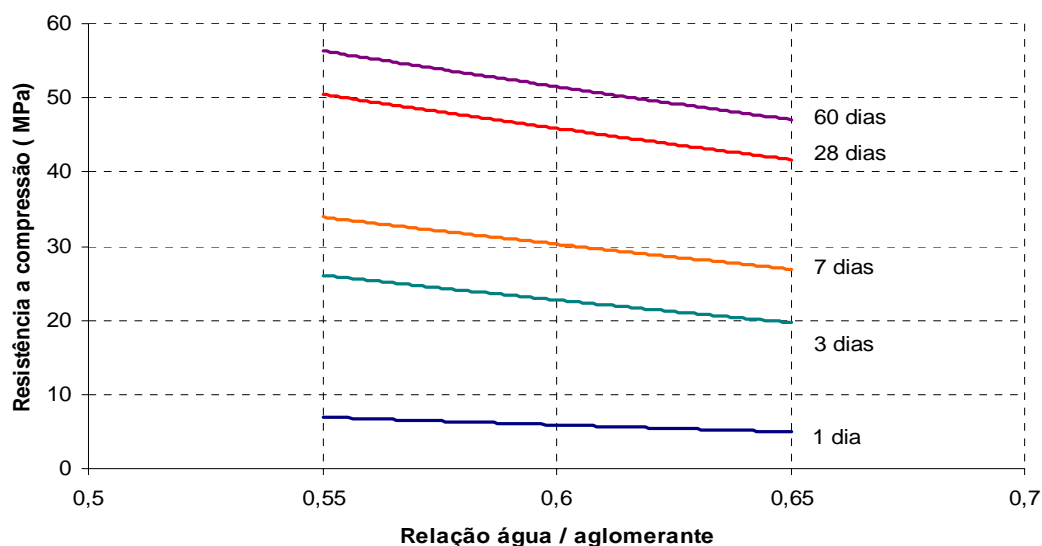


Figura 4.3 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque

4.2.3 Resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal

A resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal apresentou uma queda acentuada em comparação com a adição de 8% da mesma escória. Em todas as idades, os resultados foram menores que o valor referência (sem adição) em 27%, 20%, 15% e 10% nas idades de 3, 7, 28 e 60 dias respectivamente.

Não foi possível a determinação da resistência à compressão na idade de um dia para as relações água/aglomerante de 0,60 e 0,65.

A redução da resistência à compressão para os concretos com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal está relacionada com a reatividade da escória. Os resultados da resistência à compressão obtidos no concreto confirmaram os resultados obtidos no *índice de atividade pozolânica*, onde foi obtido 86,3% da resistência da amostra sem adição conforme demonstrado na Tabela 3.7 anteriormente.

Verificou-se também que o aumento do teor de escória de alto-forno à carvão vegetal nos traços de concreto resultou na queda na resistência em todas as idades.

A Tabela 4.3 apresenta a redução percentual da resistência à compressão entre os traços com 8% e 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal. para as idades de 3, 7, 28, e 60 dias, para as relações água/aglomerante de 0,65, 0,60 e 0,55.

Tabela 4.3 - Redução da resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal em comparação com o concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal

Relação água/aglomerante	Redução da resistência			
	3 dias	7 dias	28 dias	60 dias
0,65	27%	18%	8%	3%
0,60	17%	12%	10%	11%
0,55	16%	10%	10%	12%

A Figura 4.4 apresenta o efeito da relação água/aglomerante na resistência do concreto pela curva de Abrams para os traços de concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal.

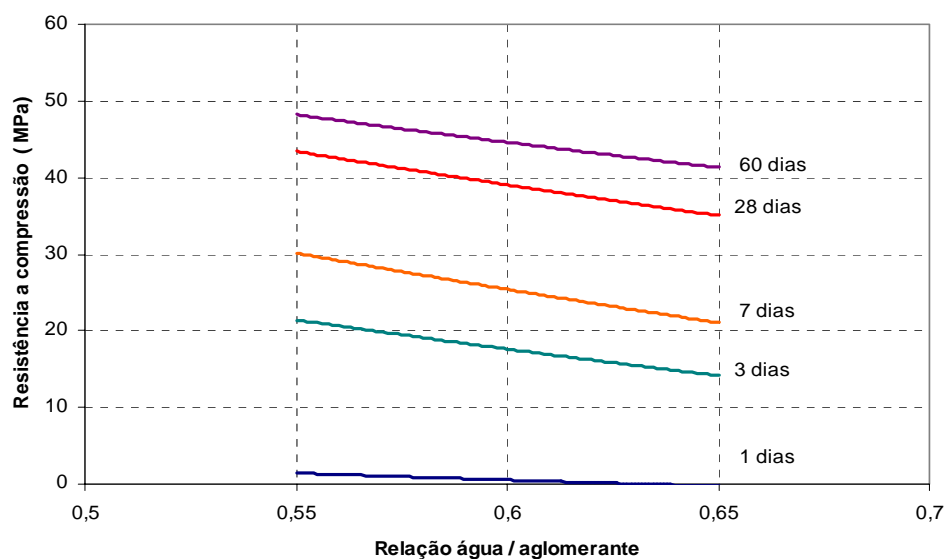


Figura 4.4 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal

4.2.4 Resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque

A resistência à compressão do concreto com adição de 57% de escória à coque apresentou também queda nas idades de 1, 3 e 7 dias igual à 67%, 18% e 7% respectivamente, em relação ao valor referência (sem adição).

Nestas idades, verificou-se que com o aumento do teor de escória em relação ao valor referência, as resistências à compressão foram menores porque a hidratação das escórias é mais lenta que a do clínquer. As resistências à compressão nas idades mais avançadas foram maiores em 3% aos 28 dias e 5% aos 60 dias.

Comparando os traços com 8% e 57% de adição de escória à coque, verificou-se que com o aumento do teor da adição as resistências foram menores até o 7º dia e maiores após o 28º dia conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Redução/aumento da resistência à compressão do concreto com adição de 8% de escória de alto-forno à coque em comparação com o concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque

Relação água/aglomerante	Resistência do concreto				
	Redução			Aumento	
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	60 dias
0,65	-77%	-14%	-3%	2%	1%
0,60	-65%	-17%	-4%	3%	2%
0,55	-48%	-11%	-2%	3%	2%

O sinal negativo significa redução

Diversos autores justificam este comportamento devido à redução da porosidade capilar (BATAGIN e ESPER, 1988). Para METHA e MONTEIRO (1994), este comportamento é resultado do refinamento dos poros associado às reações pozolânicas, ao aumento do C-S-H⁽²³⁾ e de outros produtos de hidratação à custa do hidróxido de cálcio.

É consenso entre os pesquisadores que o aumento do teor de escória nas dosagens proporciona reduções nas resistências nas idades iniciais e aumento nas idades avançadas (SWAMY e BARBOSA, 1998; MONTANI 1996).

O aumento da resistência à compressão em idades avançadas está relacionado entre outros fatores com a cura úmida.

A necessidade de proteger o concreto, disponibilizando a umidade por um longo período, é fundamental quando se utiliza escória de alto-forno para obter altas resistências finais (SWAMY e BARBOSA, 1998; VENUAT, 1976).

⁽²³⁾ C-H-S: Silicato de cálcio hidratado.

A Figura 4.5 apresenta o efeito da relação água/aglomerante na resistência do concreto pela curva de Abrams para os traços de concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque.

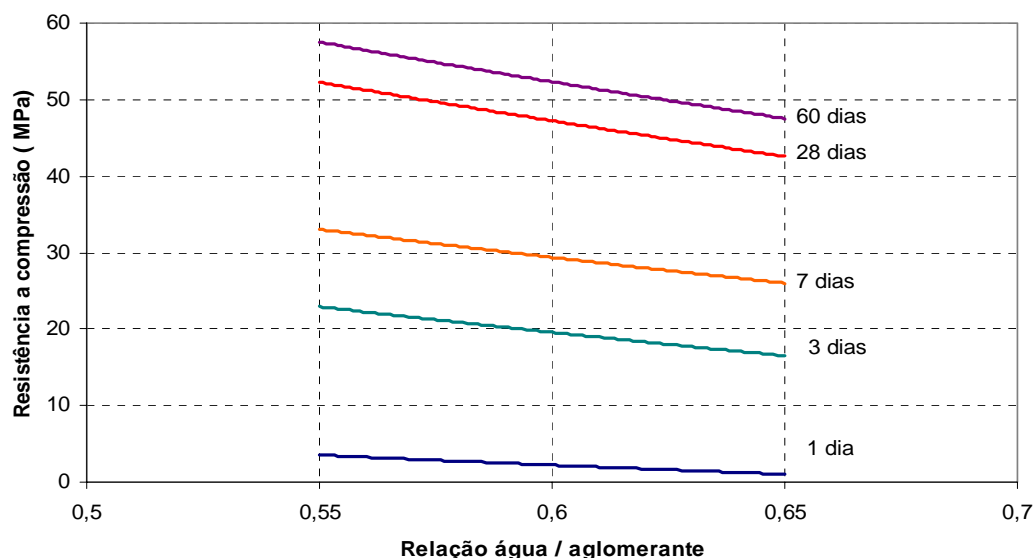


Figura 4.5 - Curvas de Abrams do concreto com adição de 57% de escória de alto-forno à coque

4.3 Resistência à tração na flexão

Todas as considerações realizadas para os ensaios de resistência à compressão são válidas para os ensaios de resistência à tração na flexão. Para esta propriedade foram realizados ensaios na idade de 28 dias.

Verificou-se que a resistência à tração na flexão do concreto aumentou com a redução da relação água/aglomerante para todos os traços propostos, conforme demonstrado na Figura 4.6 a seguir.

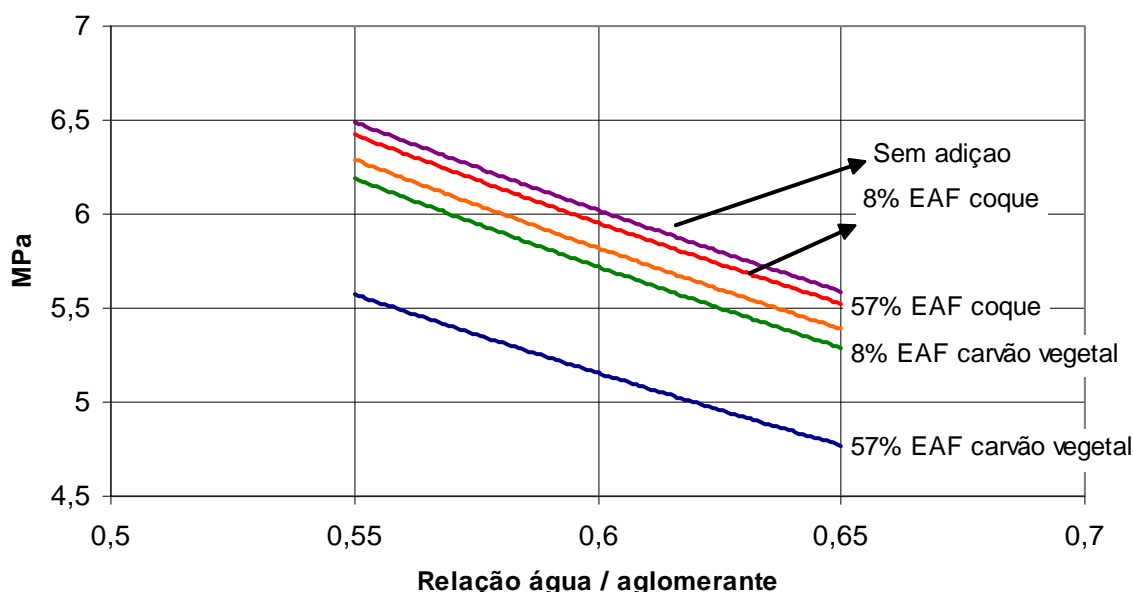


Figura 4.6 - Influência da adição de escória na resistência à tração na flexão aos 28 dias para as relações água/aglomerante 0,65, 0,60 e 0,55

Observou-se que com o aumento da resistência à compressão, f_c , a resistência à tração na flexão aumentou, mas a uma razão decrescente conforme citado em NEVILLE (1982).

WALKER e BLOEM (1960) *apud* NEVILLE (1982), apresentaram estudos realizados no laboratório da Portland Cement Association (PCA) para resistência à compressão entre 35 MPa e 55 MPa onde relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão ($f_{ct}M/f_c$) variou de 0,14 a 0,12.

Os modelos de regressão obtidos para resistência à tração na flexão pela relação a/c aos 28 dias estão apresentados no Anexo C, onde o menor coeficiente de determinação (r^2) obtido foi de 99,23%.

Neste estudo os resultados obtidos apresentaram a mesma relação ($f_{ct}M/f_c$) de 0,14 a 0,12 citada acima, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Relação entre a resistência à tração na flexão com a resistência à compressão

	Traço	Relação água/aglomerante	$f_{ct}M$ (MPa) 28 dias	f_c (MPa)	$f_{ct}M/f_c$
Concreto sem adição (traço referência)	A1	0,65	5,5	41,2	0,13
	A2	0,60	6,0	45,8	0,13
	A3	0,55	6,4	51,4	0,12
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal (Adição total de 35%)	B1	0,65	5,3	38,1	0,14
	B2	0,60	5,7	43,8	0,13
	B3	0,55	6,2	48,1	0,13
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal (Adição total de 70%)	B4	0,65	4,8	34,9	0,14
	B5	0,60	5,1	39,3	0,13
	B6	0,55	5,6	43,3	0,13
Concreto com adição de 8% de escória à coque (Adição total de 35%)	C1	0,65	5,6	41,7	0,13
	C2	0,60	6,0	45,8	0,13
	C3	0,55	6,5	50,5	0,13
Concreto com adição de 57% de escória à coque (Adição total de 70%)	C4	0,65	5,4	42,5	0,13
	C5	0,60	5,8	47,4	0,12
	C6	0,55	6,3	52,2	0,12

4.4 Módulo de elasticidade

Neste estudo foi determinado o módulo de elasticidade – E_{ci} conforme a norma NBR 8522 (ABNT, 2003a) aos 28 dias.

Verificou-se que a variação no módulo de elasticidade ocorreu unicamente devido à relação água/aglomerante e conseqüentemente a resistência à compressão.

Os traços com adição de 57% de escória de alto-forno à carvão vegetal apresentaram os menores módulos de elasticidade devido a menor resistência à compressão.

A análise descrita está apresentada da Figura 4.7, com destaque para os traços com adição de 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal.

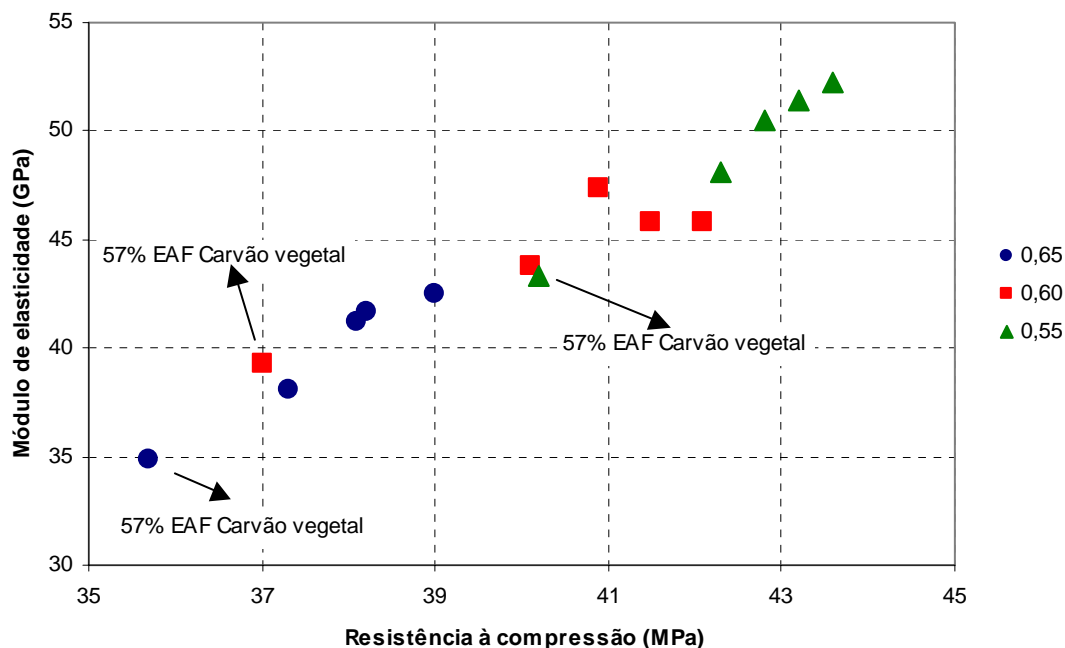


Figura 4.7 - Relação entre o módulo de elasticidade com a respectiva resistência à compressão

O teor de argamassa, a quantidade de água e a formação geológica dos agregados foram constantes neste estudo, portanto os resultados obtidos confirmaram que, se mantido fixas as variáveis citadas, quanto maior a relação água/aglomerante, menor será o módulo de elasticidade (MASSUCATO *et al.*, 2002; MEHTA e MONTEIRO 1994).

A análise, também, pode ser evidenciada pela determinação da constante adotada para estimar o módulo de elasticidade pela resistência à compressão.

A NBR 6118 (ABNT, 2003b) apresenta a expressão de estimativa do valor do módulo de elasticidade:

$$E_{ci} = 5600 * f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade;

f_{ck} = Resistência característica à compressão do concreto.

Com os resultados obtidos nos ensaios, calculamos a constante⁽²⁴⁾ da equação pela relação do módulo de elasticidade (E_{ci}) dividido raiz quadrada do f_{ck} onde obtivemos a expressão:

$$E_{ci} = 6031 * f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 2})$$

O desvio padrão para o cálculo da constante foi de 87.

As propostas de índices de correção do IBRACON (2003) para o módulo de elasticidade em função da natureza do agregado e da consistência do concreto de 1,1 para a rocha basáltica e 1,0 para o concreto com consistência plástica respectivamente, também foram confirmadas com a aplicação dos índices na equação da NBR 6118 (ABNT, 2003b), apresentada anteriormente, resultando na seguinte equação:

$$E_{ci} = 6160 * f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 3})$$

As variações nos resultados para o cálculo da constante do módulo de elasticidade são aceitáveis por serem menores que as variações admitidas no ensaio de resistência à compressão de 2,5 MPa ou 8% (ABNT, 2003c).

⁽²⁴⁾ Constante = $E_{ci}/f_{ck}^{1/2}$.

4.5 Consistência do concreto pelo abatimento

A avaliação dos resultados obtidos na consistência do concreto foi feita com os traços de mesma relação água/aglomerante. Verificou-se que a média da consistência do concreto pelo abatimento, para cada relação água/aglomerante, para todas as adições propostas, foi de 140 mm, 130 mm e 100 mm para as relações água/aglomerantes de 0,65, 0,60 e 0,55, respectivamente.

A NBR 7212 (ABNT, 1984), define as tolerâncias admitidas para o ensaio de abatimento de ± 10 mm para concreto com abatimento até 90 mm e de ± 20 mm para concreto com abatimento de 100 mm até 150 mm.

Como os resultados obtidos para o abatimento dos traços em cada relação água/aglomerante estão dentro dos limites estabelecidos, concluiu-se que tanto as adições ensaiadas como as quantidades não interferiram na consistência do concreto para uma mesma relação água/aglomerante.

Verificou-se também que a queda do abatimento de 140 mm para 100 mm entre as relações água/aglomerante de 0,65 para 0,55 foi devido à redução da relação água/aglomerante que aumentou a área superficial de sólidos (agregados e cimento), de modo que com uma mesma quantidade de água, obteve-se uma trabalhabilidade menor (NEVILLE, 1982).

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de abatimento no concreto pelo abatimento do tronco de cone (slump-test).

Tabela 4.6. Resultados dos ensaios de abatimento no concreto (slump-test)

Abatimento do concreto – slump-test (mm)	Relação água/aglomerante		
	0,65	0,60	0,55
Concreto sem adição (traço referência)	145	140	90
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal (Adição total de 35%)	140	125	90
Concreto com adição de 8% de escória à coque (Adição total de 35%)	140	125	100
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal (Adição total de 70%)	130	120	110
Concreto com adição de 57% de escória à coque (Adição total de 70%)	140	130	100
Valor médio	140	130	100

4.6 Teor de ar incorporado

Adição de escória de alto-forno à carvão vegetal ou coque nas quantidades ensaiadas não alteraram a incorporação de ar no concreto. A média obtida foi de 1,8 % com desvio padrão de 0,08%.

Segundo NEVILLE (1982), a variação na trabalhabilidade, alteração na área específica dos aglomerantes e os efeitos dos aditivos podem levar a variação do teor de ar incorporado.

Como neste estudo as causas acima citadas não ocorreram, verificou-se a estabilidade nos resultados obtidos nos ensaios.

4.7 Tempo de pega

O tempo de início e fim de pega foi determinado nos traços sem adição e com 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque.

Este estudo demonstrou que a porcentagem de substituição do cimento por escória foi o mais importante fator na alteração desta propriedade, embora a relação água/aglomerante também tenha uma pequena influência.

Os concretos sem adição apresentaram tempo de início de pega 24% menor que o concreto com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e 29% menor que o concreto com adição de escória de alto-forno à coque. A mesma diferença foi encontrada para o tempo de fim de pega.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam o tempo de início e fim de pega dos traços estudados.

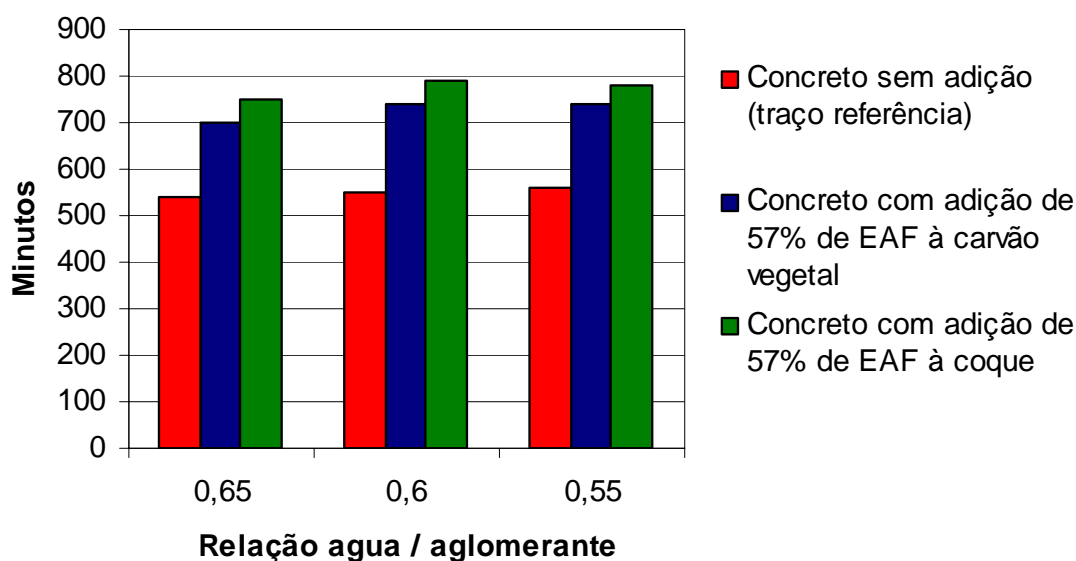


Figura 4.8 - Comportamento do tempo de início de pega em função do tipo de adição de escória e relação água/aglomerante

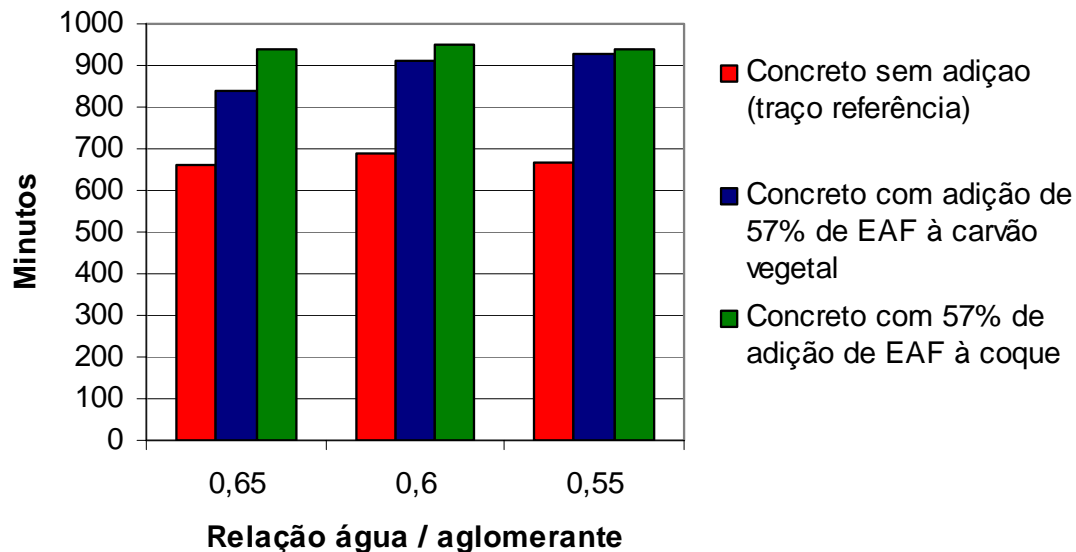


Figura 4.9. Comportamento do tempo de fim de pega em função do tipo de adição de escória e relação água/aglomerante

SWAMY e BARBOSA (1988), citam que a escória atua como retardador de pega e que o principal fator que influencia os tempos de endurecimento é o nível de substituição do cimento. A mesma conclusão foi encontrada em nosso estudo.

4.8 Exsudação

A exsudação é uma característica da maioria dos concretos que empregam escórias, bem como a alteração no tempo de pega (SWAMY e BARBOSA, 1988).

Neste estudo esta característica foi confirmada com média de 2,5% de exsudação para o concreto sem adição, 8% para o concreto com 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e 9% para o concreto com adição de 57% escória de alto-forno à coque.

A Figura 4.10 apresenta o comportamento da exsudação com as diferentes adições de escória.

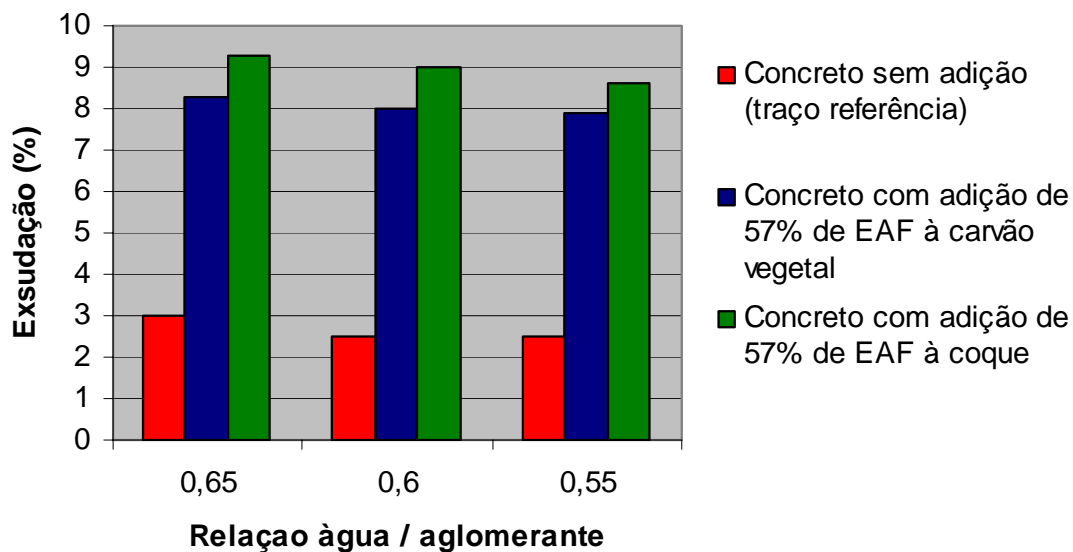


Figura 4.10 - Comportamento da exsudação para os traços sem adição e com 57% de adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque

O fato dos concretos com adições apresentarem exsudações muito superiores aos concretos sem adição não deve ser tratado como prejudicial.

NEVILLE (1982), apresenta que, se a exsudação prosseguir sem perturbações e ocorrer a evaporação da água, a relação água/aglomerante real poderá diminuir, aumentando assim a resistência.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a exsudação é um fator importante de redução das fissuras de retração plástica. Por outro lado, a exsudação pode proporcionar superfícies fracas em pisos e lajes com tendência a pulverulência.

4.9 Análise econômica

Pelos resultados dos ensaios em concreto, observou-se ganhos e perdas de resistência com a utilização de escória em substituição a parte do cimento.

A viabilidade econômica de sua utilização dependerá de uma conjuntura dos custos das matérias-primas a serem analisadas.

Para avaliarmos a viabilidade econômica da substituição de cimento por escória, adotamos uma composição hipotética de custos para traços de concreto, onde o custo do cimento⁽²⁵⁾ representa 74% do custo das matérias-primas do concreto⁽²⁶⁾. Com estes valores definimos duas relações para esta análise:

Índice técnico = Quantidade de aglomerante/resistência do concreto aos 28 dias, expresso em Kg / MPa.

Índice econômico = Custo da matéria-prima do concreto/resistência do concreto, expresso em R\$ / MPa.

Exemplificando o cálculo para o traço A1 (concreto sem adição com a/c 0,65):

Consumo de cimento por m³: 269 Kg;

Resistência do concreto aos 28 dias: 41,2 MPa;

Custo do traço do concreto hipotético: R\$ 113,30.

$$\text{Índice técnico} = 269 / 41,2 \Rightarrow 6,52 \text{ Kg /MPa}$$

$$\text{Índice econômico} = 113,30 / 41,2 \Rightarrow 2,75 \text{ R\$ / MPa}$$

⁽²⁵⁾ Custo do cimento hipotético adotado: R\$ 300,00/tonelada.

⁽²⁶⁾ Matéria-prima do concreto: cimento, agregado miúdo e gráudo e aditivo.

Quanto maior o valor do *índice técnico* maior será o consumo de cimento e quanto menor o valor do *índice econômico* menor será o custo do concreto para determinada resistência.

A Tabela 4.7 apresenta a média dos índices técnico e econômico para os traços estudados com cada quantidade e tipo de escória para a idade de 28 dias.

Tabela 4.7 - Rendimento técnico e econômico dos traços estudados

Traços estudados	Rendimento econômico (R\$/MPa)	Rendimento técnico (Kg/MPa)
Concreto sem adição (traço referência)	2,62	6,37
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal (Adição total de 35%)	2,79	6,78
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal (Adição total de 70%)	3,08	7,48
Concreto com adição de 8% de escória à coque (Adição total de 35%)	2,62	6,38
Concreto com adição de 57% de escória à coque (Adição total de 70%)	2,54	6,19

Os traços com adição de escória de alto-forno à coque apresentaram *índice econômico* igual e menor que o concreto sem adição, para teores de 8% e 57% de adição de escória, respectivamente. Da mesma forma, o *índice técnico* foi praticamente igual e menor que o concreto. Conclui-se que para o mesmo consumo de cimento, com adição de escória, comparado com 100% de cimento, apresenta a mesma resistência do concreto, portanto se a escória de alto-forno à coque custar menos que o cimento o custo do concreto será reduzido.

Para os traços com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal, tanto o *índice econômico* como o *técnico* foi maior, comparado com o concreto sem adição.

Para que se obtenha a mesma resistência e, conseqüentemente, o mesmo custo do concreto é necessário aumentar o consumo de cimento dos traços com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal. Para viabilizar a sua utilização no traço com 57% de adição a escória deveria custar 26% a menos que o cimento. E no traço com 8% de adição a escória torna-se inviável.

Para cada idade a ser analisada uma nova relação nos custos será estabelecida.

5. CONCLUSÕES

A proposta deste estudo foi analisar algumas propriedades do concreto fresco e do endurecido com adições de escória de alto-forno à carvão vegetal, em concretos produzidos com cimento compostos, ou seja, com adição de escória de alto-forno na produção, comparando com concreto sem adição e com adição de escória de alto-forno à coque.

Observou-se que, a utilização da escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto, reduz a resistência à compressão e à tração na flexão em todas as idades verificadas, em comparação com traços sem adição e com adição de escória de alto-forno à coque, independente do percentual de adição adotado.

Os concretos com adição de escória de alto-forno à coque apresentaram resistência mecânica maior que os concretos sem adição nas idades superiores a 28 dias.

A diferença encontrada na evolução da resistência mecânica deve ser analisada criteriosamente, devido às implicações que podem ser geradas nas estruturas nas diversas etapas construtivas, como por exemplo, o tempo de desforma.

Ao fixar o teor de argamassa, a quantidade de água e a formação geológica dos agregados, verificou-se que o módulo de elasticidade do concreto variou em função da

resistência a compressão axial, não sofrendo alterações em função da quantidade ou tipo de adição.

As propriedades do concreto no estado fresco (abatimento, incorporação de ar, tempo de pega e exsudação), não apresentaram diferenças significativas entre as escórias de alto-forno à carvão vegetal e à coque.

Em comparação com o concreto sem adição, o tempo de pega e a exsudação foram as propriedades que apresentaram maiores diferenças. O retardo no tempo de pega é uma característica de concretos com adição de escória de alto-forno.

O aumento verificado na exsudação pode ser atribuído a diferença na finura das escórias de alto-forno à carvão vegetal ($3850 \text{ cm}^2/\text{g}$) e à coque ($3800 \text{ cm}^2/\text{g}$) que foram menores que a finura do cimento ($4540 \text{ cm}^2/\text{g}$), confirmando a causa apresentada por BATAGIN e ESPER (1998).

A viabilidade econômica do emprego da escória de alto-forno à carvão vegetal deverá ser avaliada correlacionando a porcentagem de adição, o custo da escória e a resistência do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **POGT 5006**: determinação do teor de escória por dissolução seletiva por EDTA. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ata de reunião 23º da CE 18.305.01** controle da qualidade do concreto. São Paulo, 2005.

_____. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737**: cimento Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5743**: cimento Portland – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 9203**: cimento Portland comum e clínquer – análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 5745**: cimento Portland – determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 5747**: cimento Portland – determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989.

- _____. **NBR 5746:** cimento Portland – determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 5744:** cimento Portland – determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 5752:** materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5738:** concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5739:** concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 7211:** agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 7215:** cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 7227:** cimento Portland – determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 8953:** concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 8522:** concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva de tensão – deformação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9775:** agregados – determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10004:** classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11583:** cimento Portland – determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11578:** cimento Portland composto - Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11579:** cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº. 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11580:** cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11581:** cimento Portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11582:** cimento Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12142:** concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12821:** preparação de concreto em laboratório. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 12653:** materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12654:** controle tecnológico de materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12655:** concreto – preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 9:** concreto e argamassa – determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 23:** cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 26:** agregados – amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 33:** concreto – amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 47:** concreto – determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 76:** cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **PROJETO NBR 12655:** preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

AITICIN, PIERRE-CLAUDE. **Concreto de alto desempenho.** São Paulo: PINI, 2000.

BATAGIN, A. F.; ESPER. M.W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno.** São Paulo: ABCP, 1988.

BRAVO, C. S. **Escórias de alto-hornos atípicas.** Tucuman: UNT, 2000.

CINCOTTO, *et al.* **Caracterização de Escória granulada de alto-fornos e seu emprego como aglomerante e agregado.** São Paulo: IPT, 1992.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 102:96:** concreto – determinação da exsudação. Rio de Janeiro. ABNT, 1996.

_____. **Anteprojeto de norma 05:03-0903:** concreto dosado em central - Uniformidade do concreto da betonada. Rio de Janeiro. ABNT, 1998.

_____. **Anteprojeto de norma 05:03-0900:** concreto dosado em central – Especificação para execução . Rio de Janeiro. ABNT, 1998.

DEMOULIAN, *et al.*... Détermination de la teneur en laitier dans les ciments par dissolutions sélectives – In: Congrès International de la Chimie des Ciments. Vol II. pp III-151/156. Editions Septima: Paris, 1980.

IBRACON. **Prática recomendada IBRACON comentários técnicos NB-1.** São Paulo, 2003.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN. **IRAN 1601:** água para morteros y hormigones de cemento Portland. Buenos Aires, 1986.

IISI - INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. **The management of steel plant ferruginous by-products.** Belgium: IISI, 1994. p2-7.

JACOMINO, V. M. F. *et al.* **Controle ambiental das indústrias de produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal.** Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302 p. ISBN: 85-88669-0566.

JOHN, VANDERLEY M. **Cimento de escória ativada com silicatos de sódio.** São Paulo: Tese (Doutorado) Poli – USP, 1995. 200p.

MALHOTRA, V.M. **Comparative evaluation of three different granulated slags in concrete.** Canadá: Report MSL/87-50, CANMET1986.

MARQUES, J. C. **Escória de alto-forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassa e concreto.** São Paulo: Dissertação (Mestrado) Poli – USP, 1994.

MASSUCATO, C.J. *et al.* Contribuição experimental sobre o módulo de deformação secante para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 45., 2002, Goiânia. **Anais...** Goiânia: IBRACON, 2002. 1CD-ROM.

MATHER, B. Laboratory tests of Portland blast-furnace slag cement. American Concrete Institute. **Proceeding**. USA: ACI, 1957. p. 205-32.

MAZZARELA, *et al.* Elephant grass pilot project: charcoal source for industrial uses. In: Biomass and Bioenergy Conference. 2004, **Proceedings**. Charleston, SC, USA – Nov. 2004.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. Pini, 1994.

MONTANI, S. **Estudo sobre escória de alto-forno de ECOTRADE**. Brasil: Holderbank, 1996.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1982.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Capim-elefante: de pasto a carvão mineral**. São Paulo: OESP, 2005.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **SDE suspeita de cartel do cimento**. São Paulo: OESP, 2005.

SCA. Statistics. Disponível em:

<http://www.slagcement.org/shared/custompage/custompage.jsp?_event=view&id=445505_c_sU128801_s_i148636. Acesso em: 25/04/2005.

SINDIFER. Estatísticas da siderurgia. Disponível em:

<<http://www.sindifer.com.br/Anuario%202003.htm>. Acesso em: 25/04/2005.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. **Anuário 2001**. Rio de Janeiro: SNIC, 2001. p.33.

SOARES, A.K. (coordenador do projeto). **Caracterização de escória siderúrgicas com propriedades aglomerantes**. São Paulo: ABCP, 1982. 211p. (Relatório final do projeto – Contrato de compromisso de cooperação técnica financeira 24/81)

SOEDA, M.; YAMATO, T.; EMOTO, Y. Frost durability of high performance concrete incorporating slag or silica fume. In.: PROCEEDINGS, SECOND CANMET/ACI

INTERNATIONAL CONFERENCE. Gramado, Brazil: ACII. **Anais...** 1999. p. 409 - 426.

SOBRAL, H. S. **Reologia e trabalhabilidade dos concretos**. São Paulo: ABCP, 1983.

SWAMY, R. N.; BARBOSA. N.P. **Desenvolvimento de concretos duráveis e resistentes através do uso de cinzas volantes e escória de alto-forno moída**. Paraíba: SCIENTEC, 1998.

SMOLCZYK, H. G. Structure of slags and hydration of slags cement. In: International Congress Chemistry of Cement. **Proceedings**. 7, Paris: Septima, 1980. vol. I. Paris, 1980.

TANGO, C. E. S. *et al.*. Contribuição à normalização da adição de escória ao concreto, na obra ou na usina. In REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 1994, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre: IBRACON, 1994. 14 p.

VENUAT, M. Fabricação e aplicação de cimento de escória. In: Colóquio sobre Cimento Portland de Alto-forno. **Anais...**São PAULO: IBRACON,1976. 35 p.

ANEXOS

ANEXO A – Relação dos produtores de ferro-gusa, número de altos-fornos e capacidade nominal

Empresas	Localização	Altos Fornos	Cap. Nom. (t/m)
AVG Siderurgia Ltda	Sete Lagoas	2	20.000
Brasil Verde Siderurgia Ltda	Conc. Pará	1	5.000
Calsete - Indústria Calc. Sete Lagoas Ltda	S. Lagoas/Itabira	2	14.000
Carmense Comercial Ltda	C. da Mata	1	1.500
CBF - Indústria de gusa Ltda	Viana / J. Neiva	4	32.000
Cia Metalúrgica Espírito Santo	Fundão - ES	1	6.500
Cia Setelagoana Siderurgia - COSSISA	Sete Lagoas	3	21.000
Cia. Siderúrgica Lagoa da Prata	Lagoa da Prata	1	6.000
Cia. Siderúrgica Pitangui	Pitangui	3	19.500
Cia. Siderúrgica Santa Bárbara Ltda	Viana	1	8.000
Cia. Siderúrgica Vale do Pindaré	Açailândia/MA	2	22.000
Cia Siderúrgica Maravilhas Ind.e Com.Ltda	Maravilhas	1	3.000
Cisam Siderúrgica Ltda	P.Minas/Divinópolis	2	14.500
Citygusa Siderurgia Ltda.	P. Leopoldo	1	6.000
Coirba Siderurgia Ltda / Rede Gusa	Sete Lagoas	2	14.000
Cosima - Cia. Siderúrgica do Maranhão.	St. Inês/MA	2	22.000
Cosimat - Siderúrgica Matozinhos Ltda	Matozinhos	1	7.000
Cosipar - Cia. Siderúrgica do Pará	Marabá - PA	4	40.000
Ferdil - Produtos Metalúrgicos Ltda	Divinópolis	1	3.000
Fergumar - Ferro Gusa do Maranhão Ltda.	Açailândia	2	18.000
Ferguminas	Itaúna	2	15.000
Ferroeste Industrial Ltda	Divinópolis	1	5.500
Fermix S/A	Sete Lagoas	1	8.000
Gerdau S/A	Contagem	2	20.000
Gusa Nordeste S/A	Açailândia/MA	2	18.000
Ibérica - Siderúrgica Ibérica do Pará S/A	Pará	1	15.000
Insivi - Ind. Siderúrgica Viana Ltda	Sete Lagoas	4	21.000
Itasider - Usina Siderúrgica Itaminas S/A	Sete Lagoas	2	21.000
Lucape Siderurgia Ltda	Ressaquinha/Curvelo	4	18.000
Margusa - Maranhão Gusa S/A	Rosário	1	8.000
Matprima Comércio de Metais Ltda	Divinópolis	3	13.000
Metalsider Ltda	Betim	7	28.000
Minasgusa Ltda	Itaúna	1	3.500
MGS - Minas Gerais Siderurgia Ltda	Sete Lagoas	1	12.000
Plantar Siderúrgica Ltda	Sete Lagoas	2	14.000
Sama - Santa Marta Siderurgia Ltda	Sete Lagoas	1	6.000
São Gonçalo Siderurgia Ltda.	S. Gonçalo do P.	1	3.300
SBL Indústria e Comércio Ltda	Bom Despacho	2	12.000
Sicafe Produtos Siderúrgica Ltda	Sete Lagoas	2	12.000

Sideral - Siderúrgica Álamo Ltda	Divinópolis	1	4.000
Siderlagos Ltda	Sete Lagoas	1	7.000
Sidermin Siderurgia Ltda	Sete Lagoas	2	12.000
Siderúna - Indústria e Comércio Ltda	Itaúna/Sete Lagoas	2	9.000
Siderpa - Siderúrgica Paulino Ltda	Sete Lagoas	2	15.000
Sidersul Ltda.	Ribas do Rio Pardo	1	8.000
Siderurgia Santo Antônio Ltda	Itaúna	1	7.800
Siderurgia Piratininga	Piratininga	1	5.000
Siderúrgica Alterosa Ltda	Pará de Minas	3	20.000
Siderúrgica Bandeirante Ltda	Sete Lagoas	2	8.500
Siderúrgica Ibiraçu Ltda	Ibiraçu / ES	1	8.000
Siderúrgica Noroeste Ltda	Sete Lagoas	1	6.500
Siderúrgica Santa Maria Ltda	Divinópolis	3	18.000
Siderúrgica São Cristóvão Ltda	Divinópolis	2	9.000
Siderúrgica São Sebastião de Itatiaiuçu S/A	Itatiaiuçu	1	8.000
Siderúrgica Valinho S/A	Divinópolis	2	10.000
Simara - Sid. Marabá S/A	Marabá / PA	2	18.000
Simasa - Sid. Maranhão S/A	Açailândia/MA	2	16.000
Sinérgica Ind. Com. Ltda.	P. de Moraes	2	12.000
Terra Metais Ltda	Marabá / PA	1	5.000
TMG Siderurgia S/A	Divinópolis	1	3.500
Transtrel Com. Exp. Ltda	Cajuru/M. Leme	2	4.200
Usimar - Usina Siderúrgica Marabá	Marabá	1	9.000
Usipar	Sete Lagoas	1	7.000
Usisete Ltda	Sete Lagoas	2	14.000
Usival - Sid. Gov. Valadares Ltda	Gov. Valadares	1	3.700
VDL Siderurgia Ltda	Itabirito	1	5.000
Viena Siderúrgica do Maranhão S/A	Açailândia/MA	4	39.000
TOTAL		123	828.500

ANEXO B – Planilha de resultados dos ensaios de compressão axial

	Traço	Relação água/aglomerante	Idade (dias)				
			1	3	7	28	60
Concreto sem adição (traço referência)	A1	0,65	5,6	21,6	28,6	41,2	44,3
	A2	0,60	6,6	23,9	31,0	45,8	50,5
	A3	0,55	7,8	26,6	35,5	51,4	55,5
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal	B1	0,65	4,4	19,0	25,6	38,1	42,8
	B2	0,60	5,3	22,0	29,1	43,8	49,5
	B3	0,55	6,5	25,1	33,2	48,1	54,7
Concreto com adição de 5% de escória à carvão vegetal	B4	0,65	0,0	13,8	20,9	34,9	41,5
	B5	0,60	0,0	18,3	25,7	39,3	44,2
	B6	0,55	1,7	21,1	30,0	43,3	48,4
Concreto com adição de 8% de escória à coque	C1	0,65	4,9	19,6	27,0	41,7	46,7
	C2	0,60	6,0	22,9	30,1	45,8	52,2
	C3	0,55	6,9	26,0	34,0	50,5	56,0
Concreto com adição de 5% de escória à coque	C4	0,65	1,1	16,8	26,2	42,5	47,2
	C5	0,60	2,1	19,0	29,0	47,4	53,0
	C6	0,55	3,6	23,2	33,2	52,2	57,2

* considerado o maior valor do par dos corpos de prova ensaiados

Valores expressos em MPa

ANEXO C - Modelo de regressão para compressão axial e tração na flexão - relação água/aglomerante x resistência (curva de Abrams)

Planilha C1 - Modelo de regressão para resistência à compressão axial – curva de Abrams

Concreto sem adição (traço de referência)					
fc 1 dia	=	-13,178	Ln (a/c) -	0,0958	$R^2 = 0,9992$
fc 3 dias	=	-29,946	Ln (a/c) +	8,6664	$R^2 = 0,9995$
fc 7 dias	=	-41,455	Ln (a/c) +	10,428	$R^2 = 0,9777$
fc 28 dias	=	-61,106	Ln (a/c) +	17,592	$R^2 = 0,9991$
fc 60 dias	=	-66,905	Ln (a/c) +	15,768	$R^2 = 0,9926$
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal					
fc 1 dia	=	-12,588	Ln (a/c) -	1,0597	$R^2 = 0,9966$
fc 3 dias	=	-36,502	Ln (a/c) +	3,3022	$R^2 = 0,9998$
fc 7 dias	=	-45,518	Ln (a/c) +	5,9426	$R^2 = 0,9995$
fc 28 dias	=	-59,71	Ln (a/c) +	12,693	$R^2 = 0,9891$
fc 60 dias	=	-71,068	Ln (a/c) +	12,531	$R^2 = 0,9907$
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal					
fc 1 dia	=	-	Ln (a/c) -	-	$R^2 = -$
fc 3 dias	=	-45,532	Ln (a/c) -	4,604	$R^2 = 0,9753$
fc 7 dias	=	-54,4	Ln (a/c) +	7,9171	$R^2 = 0,9918$
fc 28 dias	=	-50,221	Ln (a/c) +	13,396	$R^2 = 0,9973$
fc 60 dias	=	-41,405	Ln (a/c) +	23,453	$R^2 = 0,9899$
Concreto com adição de 8% de escória à coque					
fc 1 dia	=	-11,949	Ln (a/c) -	0,1981	$R^2 = 0,9933$
fc 3 dias	=	-38,272	Ln (a/c) +	3,1941	$R^2 = 0,9982$
fc 7 dias	=	-41,945	Ln (a/c) +	8,8427	$R^2 = 0,9983$
fc 28 dias	=	-52,697	Ln (a/c) +	18,959	$R^2 = 0,9998$
fc 60 dias	=	-55,497	Ln (a/c) +	23,155	$R^2 = 0,9834$
Concreto com adição de 57% de escória à coque					
fc 1 dia	=	-14,998	Ln (a/c) -	5,4296	$R^2 = 0,9918$
fc 3 dias	=	-38,455	Ln (a/c) -	0,655	$R^2 = 0,9763$
fc 7 dias	=	-41,995	Ln (a/c) +	7,9171	$R^2 = 0,9918$
fc 28 dias	=	-58,023	Ln (a/c) +	17,596	$R^2 = 0,9991$
fc 60 dias	=	-59,693	Ln (a/c) +	21,835	$R^2 = 0,9866$

Planilha C2 - Modelo de regressão para resistência à tração na flexão – curva de Abrams

Concreto sem adição (traço de referência)	fc 28 dias =	-5,376	Ln (a/c) -	3,208	R^2	0,9923
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal	fc 28 dias =	-5,393	Ln (a/c) +	2,966	R^2	0,9984
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal	fc 28 dias =	-4,803	Ln (a/c) +	2,702	R^2	0,9858
Concreto com adição de 8% de escória à coque	fc 28 dias =	-5,327	Ln (a/c) +	3,266	R^2	0,9984
Concreto com adição de 57% de escória à coque	fc 28 dias =	-5,393	Ln (a/c) +	3,066	R^2	0,9984

ANEXO D - Modelo de regressão para resistência à compressão axial x idade

Concreto sem adição (traço de referência)					
fc 0,55	=	11,463	Ln (idade)+	11,153	$R^2 = 0,9992$
fc 0,60	=	10,842	Ln (idade)+	9,234	$R^2 = 0,9832$
fc 0,65	=	9,343	Ln (idade)+	8,694	$R^2 = 0,9711$
Concreto com adição de 8% de escória à carvão vegetal					
fc 0,55	=	11,460	Ln (idade)+	9,721	$R^2 = 0,9817$
fc 0,60	=	10,521	Ln (idade)+	8,087	$R^2 = 0,9823$
fc 0,65	=	9,052	Ln (idade)+	7,404	$R^2 = 0,9728$
Concreto com adição de 57% de escória à carvão vegetal					
fc 0,55	=	12,247	Ln (idade)+	4,503	$R^2 = 0,9731$
fc 0,60	=	10,522	Ln (idade)+	3,465	$R^2 = 0,9743$
fc 0,65	=	10,313	Ln (idade)+	0,960	$R^2 = 0,9946$
Concreto com adição de 8% de escória à coque					
fc 0,55	=	11,700	Ln (idade)+	9,977	$R^2 = 0,9836$
fc 0,60	=	11,166	Ln (idade)+	8,815	$R^2 = 0,9826$
fc 0,65	=	10,097	Ln (idade)+	6,694	$R^2 = 0,9919$
Concreto com adição de 57% de escória à coque					
fc 0,55	=	12,974	Ln (idade)+	6,669	$R^2 = 0,9852$
fc 0,60	=	12,370	Ln (idade)+	3,736	$R^2 = 0,9940$
fc 0,65	=	11,216	Ln (idade)+	3,572	$R^2 = 0,9855$